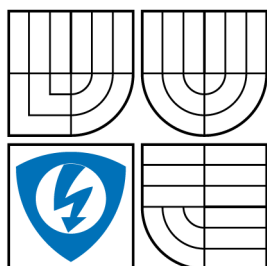


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND
COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

SIMULACE ZPOŽDĚNÍ PŘI PŘENOSU DAT MEZI STANICEMI V IP SÍTÍCH

SIMULATION OF DATA TRANSMISSION LATENCY BETWEEN NODES IN IP
NETWORKS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. JIŘÍ BALEJ

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. DAN KOMOSNÝ, Ph.D.

BRNO 2010



**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií**

Ústav telekomunikací

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Telekomunikační a informační technika

Student: Bc. Jiří Balej

ID: 78453

Ročník: 2

Akademický rok: 2009/2010

NÁZEV TÉMATU:

Simulace zpoždění při přenosu dat mezi stanicemi v IP sítích

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Nastudujte a analyzujte dílčí faktory způsobující zpoždění při přenosu paketů mezi stanicemi v IP sítích. Pro zvolené typy sítí určete poměrné zastoupení těchto dílčích faktorů. Získané teoretické poznatky implementujte do zvoleného simulačního nástroje. Proveďte simulace komunikace pro různé typy přenosových sítí a různé vzdálenosti mezi stanicemi. Výsledky simulace přehledně zdokumentujte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] PUŽMANOVÁ, R. TCP/IP v kostce. 1. vyd. České Budějovice : Kopp, 2004. 607 s. ISBN 80-7232-236-2.
- [2] ABRAHAO, B. KLEINBERG, R. On the Internet Delay Space Dimensionality [online]. ACM/SIGCOMM Internet Measurement Conference (IMC'08). Association for computing machinery, 2009. URL: <<http://www.cs.cornell.edu/~abraham/docs/imc08.pdf>> [cit. 13. 10. 2009].
- [3] NG, E. HUI, Z. Predicting Internet network distance with coordinates-based approaches [online]. INFOCOM 2002. Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. IEEE, 2002. URL: <<http://www.cs.rice.edu/~eugeneng/papers/INFOCOM02.pdf>> [cit. 13. 10. 2009].

Termín zadání: 29.1.2010

Termín odevzdání: 26.5.2010

Vedoucí práce: doc. Ing. Dan Komosný, Ph.D.

prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Diplomová práce je podrobně zaměřena na zpoždění vznikající při přenosu informace v IP sítích. Začátek práce je věnován seznámení s místy a příčinami vzniku zpoždění. Pro jednotlivé zdroje zpoždění jsou uvedeny parametry, které jej ovlivňují a obvyklé velikosti latence. Dále jsou popsány typy sítí a pro každou jsou vyjádřeny typické doby zpoždění. V práci jsou také rozebrány nástroje pro měření zpoždění a zjištění počtu mezilehlých zařízení. Další kapitola obsahuje výsledky měření doby zpoždění v reálné síti a z těchto výsledků jsou odvozeny závěry o velikosti zpoždění na jedno mezilehlé zařízení a také je vyřčen obecný poměr skutečné ku přímé vzdálenosti. Poslední část práce se zabývá simulací doby zpoždění v programu Network Simulator 2. Výsledkem práce jsou skripty pro zobrazení závislosti zpoždění na počtu přepínačů, směrovačů a délce trasy.

KLÍČOVÁ SLOVA

Zpoždění, latence, simulace, ns2, mezilehlé zařízení, vzdálenost, přepínač, směrovač, rychlost šíření signálu.

ABSTRACT

This master thesis is focused on the delays incurred in data transmitting over IP networks. The top of the paper is devoted to points, where delay is invoked and causes of the latency. For individual sources of delay are described the parameters that affect the usual size of latency. The next section describes the types of networks and their typical delay. In the paper are also discussed tools for measuring delay and determining the number of intermediate devices. The thesis contains results of measurements delay time in the real network. For these results are listed conclusions about the delay for one intermediate device. There is also said general ratio of crow-fly distance and calculated distance. The last part deals the simulation of delay in Network Simulator 2. The results of thesis are scripts that shows the relation of delay and the number of switches, routers, and the length of the path.

KEYWORDS

Delay, latency, simulation, ns2, intermediate device, distance, switch, router, speed signal propagation.

BALEJ, Jiří *Simulace zpoždění při přenosu dat mezi stanicemi v IP sítích*: diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2010. 64 s. Vedoucí práce byl doc. Ing. Dan Kosmosný, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Simulace zpoždění při přenosu dat mezi stanicemi v IP sítích“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

Brno

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Chci velmi poděkovat vedoucímu mé diplomové práce doc. Ing. Danu Komosnému, Ph.D., za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc při zpracování mé závěrečné práce.

V Brně dne

.....

OBSAH

Úvod	10
1 Zdroje zpoždění v IP sítích	11
1.1 Co je zpoždění	11
1.1.1 Charakter zpoždění	11
1.1.2 Vliv latence na celkové zpoždění	12
1.2 Zpoždění vznikající v koncových zařízeních	12
1.2.1 Paketizační a depaketizační zpoždění	12
1.2.2 Zpoždění v odchozích frontách	13
1.2.3 Zpoždění na vyrovnání jitteru	13
1.3 Závislost na přenosových linkách	13
1.3.1 Serializační zpoždění	14
1.3.2 Zpoždění způsobené rychlostí šíření signálu	15
1.3.3 Zpoždění dobou přístupu k médiu	16
1.4 Latence vznikající v mezilehlých zařízeních	16
1.4.1 Opakovač (repeater) a aktivní hub	17
1.4.2 Přepínač (switch)	18
1.4.3 L3 switch	18
1.4.4 Směrovač (router)	19
1.5 Shrnutí zpoždění	20
2 Zpoždění v reálných sítích	21
2.1 Zpoždění v místní síti	21
2.2 Zpoždění v přístupové síti	22
2.3 Zpoždění v transportní síti	23
3 Nástroje k měření zpoždění a trasy	25
3.1 Vlastnosti jednotlivých měření	25
3.1.1 Měření dostupnosti a zpoždění na různých vrstvách OSI modelu	25
3.1.2 RTT versus jednocestné zpoždění	26
3.1.3 Přímá vzdálenost versus fyzická vzdálenost	26
3.2 Program Ping	27
3.2.1 Protokol ICMP	27
3.2.2 Princip fungování programu Ping	27
3.2.3 Doba života paketu (TTL)	28
3.2.4 Ping a možnost měření šířky pásma	29
3.3 Programy Tracert a Traceroute	29

3.3.1	Varianty traceroute v linuxu	29
3.4	Aplikace zobrazující trasu na mapě	30
3.5	Zařízení Test box	30
4	Měření zpoždění v reálné síti	32
4.1	Síť sdružení Cesnet	32
4.2	Způsob měření	32
4.2.1	Konfigurace a způsob připojení měřícího počítače	32
4.3	Měření zpoždění k uživatelům sítě CESNET2	33
4.3.1	Výpočet doby zpoždění na jeden skok	34
4.3.2	Výpočet délky trasy kabelu z naměřených hodnot	37
4.3.3	Srovnání skutečné délky kabelu s přímou vzdáleností mezi městy	38
4.4	Měření doby odezvy k prvním uzlu v městě	38
4.4.1	Výpočet doby zpoždění na jeden skok	39
4.4.2	Výpočet délky trasy kabelu z naměřených hodnot	39
4.5	Aplikace výsledků měření na uzly v síti Internet	41
5	Simulace přenosového systému	45
5.1	Simulační nástroj NS2	45
5.1.1	Grafické zobrazení výsledků	45
5.2	Simulace latence přepínačů a směrovačů	46
5.2.1	Způsob realizace	46
5.2.2	Výsledky simulace	47
5.3	Simulace zpoždění délky trasy a počtu skoků	49
5.3.1	Simulace zpoždění v síti CESNET2	49
5.3.2	Simulace zpoždění v celosvětové síti	50
6	Závěr	52
	Literatura	54
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	57
	Seznam příloh	59
A	Tabulky	60
B	Obsah přiloženého CD	64

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Zdroje zpoždění a místo jeho vzniku	11
2.1	Rozdělení sítě na místní, přístupovou a transportní.	21
3.1	Mapa směřované cesty mezi Bratislavou a Mnichovem (převzato z [4])	26
3.2	Zobrazení trasy na mapě pomocí aplikace ze stránky [26].	30
4.1	Délka optických kabelů mezi jednotlivými městy v síti CESNET2 (v Km).	33
4.2	Graf průměrů a mediánů přesností pro různé doby zpoždění na jedno mezilehlé zařízení, pro různé organizace ze sdružení Cesnet.	36
4.3	Graf vypočítané a skutečné délky cesty, pro organizace ze sdružení Cesnet.	37
4.4	Graf relativní chyby vypočítané vzdálenosti, pro organizace ze sdružení Cesnet.	38
4.5	Graf průměrů a mediánů přesností pro různé doby zpoždění na jedno mezilehlé zařízení, pro první prvek sítě na vzdáleném místě.	40
4.6	Graf vypočítané a skutečné délky cesty, pro první prvky sítě v různých městech sítě CESNET2.	40
4.7	Graf přesnosti vypočítané vzdálenosti, pro první prvky sítě v různých městech sítě CESNET2.	41
5.1	Obrázek okna simulace pro tři směrovače a tři přepínače.	47
5.2	Závislost zpoždění na počtu směrovačů.	48
5.3	Závislost zpoždění na počtu přepínačů a směrovačů.	48
5.4	Závislost zpoždění na počtu směrovačů a délce trasy v síti simulující CENSET2.	50
5.5	Závislost zpoždění na počtu směrovačů a délce trasy simulující ce- losvětovou síť.	51

SEZNAM TABULEK

1.1	Tabulka serializačního zpoždění pro různě velké rámce a různé přenosové rychlosti	14
1.2	Tabulka testovaného zpoždění pro různé switche (převzato z [13]). . .	19
2.1	Tabulka velikostí zpoždění pro technologie použité v místní síti. . . .	22
2.2	Tabulka velikostí zpoždění pro technologie použité v přístupových sítích.	23
2.3	Tabulka velikostí zpoždění pro různé délky transportní sítě	24
3.1	Vybrané kódy ICMP zpráv pro Destination unreachable (podle [10]) .	28
4.1	Tabulka změřeného zpoždění a počtu skoků k dané adrese.	35
4.2	Tabulka obsahující skutečnou, přímou hodnotu vzdálenosti k městům v síti CESNET2 a jejich srovnání.	42
4.3	Tabulka naměřených a vypočtených hodnot zpoždění a vzdáleností pro první síťový prvek v různých místech sítě CESNET2.	43
4.4	Naměřené hodnoty zpoždění, počtu skoků, přímé a vypočítané vzdálenosti pro různě vzdálená místům po celém světě.	44
A.1	Relativní chyby vypočítaných vzdálenosti pro různé velikosti latence jednoho mezilehlého zařízení, různých organizací sdružení Cesnet – 1.část.	60
A.2	Relativní chyby vypočítaných vzdálenosti pro různé velikosti latence jednoho mezilehlého zařízení, různých organizací sdružení Cesnet – 2.část.	61
A.3	Relativní chyby vypočítaných vzdálenosti v závislosti na různé velikosti latence jednoho mezilehlého zařízení, pro první uzel v různých městech sítě CESNET2 – 1.část.	62
A.4	Relativní chyby vypočítaných vzdálenosti v závislosti na různé velikosti latence jednoho mezilehlého zařízení, pro první uzel v různých městech sítě CESNET2 – 2.část.	63

ÚVOD

Pojem zpoždění označuje v komunikačních technologiích dobu informace strávenou na cestě. Ačkoliv se na první pohled může zdát, že zpráva dorazila ve stejný moment jako byla odeslána, není tomu tak. Informaci trvá obletět svět dobu kratší než je mrknutí oka, ale vzhledem k potřebě komunikovat v reálném čase je i tato doba příliš dlouhá. Jak velké zpoždění bude, záleží na vlastnostech celé přenosové cesty, kterou informace absolvuje, vždy je ale snaha o jeho co nejmenší velikost. Velký vliv na zpoždění má vzdálenost komunikujících, ale i typ přenosového média a doba strávená při směřování k cíli.

Co nejpřesnější určení zpoždění, potažmo jeho zdrojů, je používáno pro zajištění kvality služeb a k určení polohy stanice v rozsáhlých sítích, jakou může být například síť Internet. Pokud stanice zná svoji polohu v síti, může kvalifikovaně rozhodnout, který server je výhodné použít například pro stahování dat (v případě existence tzv. zrcadel – mirrorů). Toto pomáhá snížit zátěž na páteřních linkách Internetu a využívat ve své blízkosti spojů s vysokou přenosovou rychlostí.

V této práci jsou zmapovány zdroje zpoždění v IP sítích na koncových zařízeních, linkách a mezilehlých prvcích sítě. Pro každou část sítě jsou vysvětleny základní zdroje zpoždění. Pro jednotlivá zpoždění je uveden ovlivňující parametr a velikost, které zpoždění nabývá. Práce dále obsahuje rozbor jednotlivých sítí a obvyklé zdroje zpoždění v těchto sítích. Pro jednotlivé typy sítí jsou uvedeny změřené velikosti zpoždění, případně obvyklé velikosti zpoždění. Poslední teoretická část práce se zabývá způsobem měření zpoždění a reprezentace výsledků.

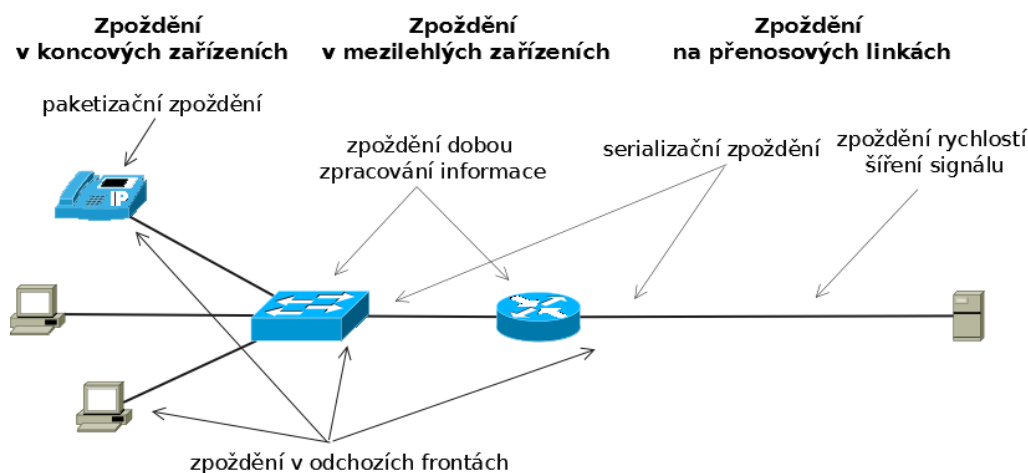
Prakticky je v práci provedeno měření zpoždění v akademické síti CESNET2 a na základě jeho výsledků je odhadnuta obvyklá doba zpoždění pro mezilehlá zařízení. Ze získaných dat je vypočítána přibližná délka vedení mezi komunikujícími stranami a ta je srovnána se skutečnou délkou kabelů. Délka trasy je přibližně určena i pro místa mimo akademickou síť a vypočtené délky trasy jsou porovnány s přímou vzdáleností.

V další části je popsána simulace vytvořená v programu Network Simulator 2, přibližující chování v reálné síti. Simulace jsou vytvořeny celkem dvě. První simuluje přenosový řetězec sestavený z definovaného počtu směrovačů a přepínačů, v druhé je brána v úvahu vzdálenost mezi komunikujícími a počet skoků mezi nimi. Výstupem obou simulací jsou grafy závislosti zpoždění na definovaných parametrech pro různé velké sítě.

1 ZDROJE ZPOŽDĚNÍ V IP SÍTÍCH

1.1 Co je zpoždění

Obecně vzato, zpoždění je doba způsobená zdržením oproti plánovanému času příjezdu, splnění, doručení, ... V telekomunikacích je za zpoždění označován čas, který se informace stráví na cestě od zdroje k příjemci. Synonymem ke zpoždění je latence; toto slovo je často používáno v souvislosti s vlastností daného prvku. Latence vznikající na jednotlivých částech komunikačního řetězce má různý charakter, velikost i vliv na celkové zpoždění. Proto je dobré definovat, co latenci způsobuje a kde v komunikačním řetězci ke zpoždění dochází (obrázek 1.1).



Obr. 1.1: Zdroje zpoždění a místo jeho vzniku

1.1.1 Charakter zpoždění

Pokud zkoumáme latenci podrobněji, zjistíme, že při opakovaných měřeních stejné přenosové trasy má zpoždění podobnou velikost. V článku [4] autoři rozdělují celkové zpoždění na jeho **deterministickou** část a **stochastickou** část. Deterministické zpoždění má konstantní velikost, která lze vypočítat, jedná se o minimální čas potřebný pro přenos zprávy. Hodnota celkového zpoždění nemůže být nikdy menší než velikost deterministického zpoždění. Oproti tomu stochastické zpoždění má náhodný charakter a je ovlivněné aktuálním stavem sítě. Stochastické zpoždění může mít nulovou hodnotu a nemusí vůbec celkové zpoždění ovlivňovat. Naopak v době velkého zatížení sítě je hodnota tohoto zpoždění poměrně vysoká. Stochastické zpoždění má zpravidla Guassovo rozložení s výrazným dozvukem (heavy tail).

1.1.2 Vliv latence na celkové zpoždění

Celkové zpoždění IP paketu je dáno součtem několika parciálních zpoždění. Tyto dílčí zpoždění způsobují všechny prvky přenosového systému. Důležité však je, nakolik a jak se na výsledném zpoždění podílejí. V následujících podkapitolách jsou popsány parciální zpoždění rozdělená dle místa svého vzniku. U každého zpoždění je uvedeno, nakolik ovlivňuje celkové zpoždění. Za **zanedbatelné** je označováno zpoždění, které má nezřetelný vliv na velikost celkového zpoždění (typicky do 1 %). **Malý vliv** má zpoždění cca do 10 % celkového zpoždění a zpoždění, které mají **velký vliv** je nutno zohlednit i v přibližných výpočtech. V případě, že dílčí zpoždění je mnohoanásobně větší než ostatní, označují jej za **dominantní**.

1.2 Zpoždění vznikající v koncových zařízeních

Koncovými zařízeními jsou zdroj a cíl přenášené informace, příkladem takových zařízení jsou počítače, servery, testovací zařízení, ale i zdroje a spotřebiče zvuku či videa (VoIP telefony, IP televize, kamery, ...). Zdrojové zařízení předpřipraví zprávu pro přenos, označí ji adresou svoji i příjemce a zabalí ji do paketů. Na druhé vrstvě OSI modelu se paket zapouzdří do rámce, či buňky (dle použité technologie) a vyšle se bit po bitu na přenosovou linku. Příjemací stanice k získání přenášené informace musí provést opačný postup. Přípravou informace pro přenos je myšlena především práce na vyšších vrstvách (4.-7.) OSI modelu a závisí na složitosti zprávy a výkonu stanice. V následujících úvahách budeme operovat pouze se zpožděním způsobeným 3. a nižší vrstvou OSI modelu. Celkové zpoždění koncového zařízení budu dále označovat t_{KZ} a skládá se z dílčích zpoždění, která jsou uvedena v následujících podkapitolách.

1.2.1 Paketizační a depaketizační zpoždění

Toto zpoždění (t_{pak}) je doba, potřebná pro vytvoření paketu – přenosové jednotky v IP sítích. Závisí na rychlosti zpracování informace počítačem a většinou je **zanedbatelné**. Pokud se však jedná o interaktivní komunikaci, závisí toto zpoždění též na velikosti paketu, objemu informace a vzorkovací frekvenci. Při tomto typu komunikace se vždy čeká než je naplněna velikost paketu hodnotami několika po sobě jdoucích vzorků (např. úryvků řeči). To způsobuje zpoždění prvního vzorku v paketu. Při depaketizaci je toto zpoždění vyrovnáno pozdržením ostatních vzorků paketu tak, aby byly stejně zpožděny jako první vzorek. Např. u kodeku hlasu G.723.1 je $t_{\text{pak}}=30 \text{ ms}$ [5].

1.2.2 Zpoždění v odchozích frontách

Hodnotu zpoždění v odchozích frontách (t_f) není možné deterministicky určit, protože je závislá na aktuálním zatížení prvku. Zpoždění v odchozích frontách se uplatňuje nejen pro zdrojové stanice, ale i pro směrovače a přepínače. Velikost tohoto zpoždění je proměnná a dá se aktuálně zjistit podle celkové velikosti paketů ve frontě a rychlosti odchozí linky (viz vztah 1.1).

Příklad: při rychlosti odchozí linky 10 Mbit/s (R) a průměrné velikosti paketu 1250 B (P) je odchozí fronta schopna obsloužit až 1000 paketů za sekundu (μ). Pokud by přicházelo 500 paketů za sekundu (λ), pak by průměrné zpoždění bylo 2 ms (t_f) a fronta je zatížená na 50 % (ρ – dle vztahu 1.2) [6] [7].

$$t_f = \frac{1}{\mu - \lambda} = \frac{1}{\frac{R}{P} - \lambda}, \quad (1.1)$$

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu}. \quad (1.2)$$

Tyto rovnice jsou platné pouze, pokud je použito řazení do front typu FIFO. V případě prioritních front, či jiných metod obsluhy front, využívaných pro zajištění QoS, není možné určit průměrnou dobu zpoždění.

1.2.3 Zpoždění na vyrovnání jitteru

Pro aplikace pracující v reálném čase je důležité, aby datové jednotky přicházely pravidelně – tzn. stejně zpožděny. Proto je v cílové stanici zabudován tzv. jitter buffer (latence jitter bufferu bude značena t_j), který má za úkol vyrovnávat zpoždění. Velikost tohoto bufferu je omezena, proto datové jednotky s větším rozptylem zpoždění jsou považovány za ztracené. Doporučený rozptyl zpoždění pro real-time aplikace je **do 100 ms** a to je i maximální velikost přidávaného zpoždění v cílové stanici. Pro přenosy proudu dat z internetu (např. IPTV) může být vyrovnávací zpoždění i větší. Naopak pro normální přenos dat není jitter významný a případné přeuspořádání různě zpožděných datových jednotek má za úkol čtvrtá vrstva OSI modelu [8].

1.3 Závislost na přenosových linkách

Přenosové linky jsou část transportní soustavy, která je přímo závislá na fyzické pozici stanic. Linky ke stanicím nejsou vedeny nejkratší cestou, ale kabely jsou pokládány na vhodných místech (například podél silnic, železnic a spolu s dálkovým vedením elektrické energie). Další prodloužení cesty paketu může způsobit směrování. Přestože existuje k cíli fyzicky kratší linka, směrovače mohou vybrat linku

jinou, například z důvodu cenové politiky, nebo rychlosti linek. Tímto narůstá délka trasy a roste i zpoždění způsobené dobou šíření signálu. Kromě fyzické vzdálenosti stanic je důležitá také technologie přenosu signálu, která ovlivňuje především přenosovou rychlost a tedy i serializační zpoždění.

Doba zpoždění přenosových linek, dále označovaná jako t_{PL} , zahrnuje zpoždění způsobené dobou šíření signálu. Serializační zpoždění je častěji uváděno v rámci latence mezilehlých zařízení, ale protože jej ovlivňuje rychlost přenosových linek je uvedeno v této části.

1.3.1 Serializační zpoždění

Serializační zpoždění (t_s) je doba od vyslání prvního bitu do odeslání posledního bitu rámce na linku. Hodnotu tohoto zpoždění ovlivňuje velikost rámce – čím větší rámec bude, tím větší bude zpoždění. A také přenosová rychlost linky – v případě pomalé linky, bude serializační zpoždění velké. Toto zpoždění vznikne za každým aktivním prvkem, kde dojde k uložení rámce do paměti. Velikost serializačního zpoždění (t_s) je předem známá a můžeme ji deterministicky určit. Dobu serializace bitů na linku spočítáme, když vynásobíme přenosovou rychlost linky (R) a velikost rámce ¹ (F) (pozor udávána v bajtech na rozdíl od přenosové rychlosti). Pro ilustraci velikosti serializačního zpoždění je uvedena tabulka 1.1, kde jsou vypočítány hodnoty zpoždění pro různé velikosti rámců a rychlosti přenosových linek. Toto zpoždění je nutné brát v úvahu pokud používáme velké rámce a malé přenosové rychlosti, při přenosových rychlostech v řádech gigabitů za sekundu je toto zpoždění **zanedbatelné** [9].

$$t_s = R \cdot F \quad (1.3)$$

Velikost rámce	Rychlost linky		
	64 Kbit/s	10 Mbit/s	10 Gbit/s
64 B	8 ms	51,2 μ s	0,0512 μ s
500 B	62,5 ms	0,4 ms	0,4 μ s
1500 B	187,5 ms	1,2 ms	1,2 μ s

Tab. 1.1: Tabulka serializačního zpoždění pro různě velké rámce a různé přenosové rychlosti

¹Protože je na 2. vrstvě OSI modelu velmi často nasazena technologie Ethernet, bývá největší velikost rámce 1518 B. Pro jiné technologie lze tuto hodnotu dohledat v literatuře.

1.3.2 Zpoždění způsobené rychlostí šíření signálu

Rychlost šíření signálu je fyzikální veličina, která specifikuje, jak dlouho trvá cesta dat z jednoho konce média na druhý. Velikost zpoždění způsobená rychlostí šíření (t_{rs}) je závislá nejen na použitém médiu, ale především na délce fyzické trasy. Skutečná délka média je často výrazně vyšší než je vzdálenost vzdušnou čarou a je tedy nutné na to pamatovat (více o fyzické vzdálenosti je napsáno v kapitole 3.1.3).

Přestože se rychlost šíření signálu v médiu blíží rychlosti světla ve vakuu ($c = 299\,792\,458$ m/s), pro dlouhé vzdálenosti (nad 1000 km) má tato latence **velký** podíl na celkovém zpoždění. Například při mezikontinentální komunikaci je hodnota tohoto zpoždění v řádu desítek až stovek milisekund.

V následujících podkapitolách jsou popsána nejpoužívanější přenosová média a typické parametry pro tato média.

Metalický kabel

Metalické kabely jsou nejčastěji využívány v LAN sítích a v sítích přístupových. Dříve používaný sdílený koaxiální kabel, v dnešní době nahradil kabel UTP (unshielded twisted pair), případně STP (shielded twisted pair). Toto médium umožňuje rychlost 100 Mbit/s a při použití všech čtyř párů dokonce rychlosti v gigabitech za sekundu. Vodičem se šíří elektrický proud rychlostí $0,75 \cdot c$, což je přibližně 224 844 km/s [10].

Kabely značky Solarix udávají pro UTP cat5E a cat6 zpoždění rychlostí šíření 535 ns/100 m, pro cat7 Solarix uvádí zpoždění 427 ns/100 m [11].

Optický kabel

Optická vlákna jsou majoritně zastoupena na transportních sítích a prosazují se i do sítí přístupových. Často propojují místa, kde je potřebná velká přenosová rychlost na dlouhé vzdálenosti. Rychlost šíření, závisí na indexu lomu v jádru vlákna a je přibližně 194 895 km/s, tj. $0,65 \cdot c$ [10]. Po přepočtu zpoždění na 100 m vyjde hodnota 513 ns. Vzhledem k tomu, že některé transportní sítě měří i několik tisíc kilometrů, má tato latence **velký** vliv na celkové zpoždění.

Bezdrátový přenos

Bezdrátové technologie mají velkou výhodu, neboť uživatelé dovolují mobilitu a nezávislost na připojení kabelem. Využívají se především v přístupových a lokálních sítích. Dnes používané bezdrátové techniky jsou GSM, WiFi, WiMax, satelitní spoje a mikrovlnné spoje. Všechny tyto techniky mají společnou rychlost šíření signálu, která se téměř rovná rychlosti šíření světla ve vakuu, to znamená zpoždění

334 ns/100 m. Velký rozdíl mezi jednotlivými technologiemi je v délce cesty signálu. GSM, WiFi a WiMax jsou buňkové technologie, kdy největší poloměr buňky má GSM (35 Km) a to v porovnání s ostatními zdroji zpoždění způsobuje malé zpoždění. Mikrovlnné spoje slouží k propojení fixních bodů na delší, ale viditelnou vzdálenost. Proto je fyzická cesta signálu kratší než je tomu u kabelů a zpoždění šířením signálů je také **malé**.

U satelitního spojení je velikost latence v celkovém zpoždění **dominantní**. Způsobuje to především nutnost komunikovat s družicí, která je na oběžné dráze země a výrazně prodlužuje cestu signálu. Satelity obíhají planetu na různých oběžných drahách, nejnižší z nich je LEO (low-Earth orbit) ve vzdálenosti 600 – 2000 Km nad povrchem země, zpoždění k družici je potom 4 – 8 ms. Družice na vrstvě MEO (medium-Earth orbit) se nachází ve vzdálenosti 2000 – 35 000 Km a zpoždění signálu letícího k nim je až 100 ms. Nejvýše položená je vrstva GEO (geostacionary-Earth orbit) ve vzdálenosti 35 786 Km nad zemí. Tato vrstva má oproti ostatním výhodu v tom, že družice zůstává nad povrchem stále na stejném místě a je tedy možné na ni nasměrovat anténu (satelit). Zpoždění pro tento systém nabývá vysoké hodnoty okolo 270 ms. Všechna zpoždění uvedená k družicím jsou vztažena k jednomu směru (družice – země, nebo země – družice) [12].

1.3.3 Zpoždění dobou přístupu k médiu

Zpoždění dobou přístupu k médiu t_{pm} se uplatňuje především u technologií se sdíleným médiem (ethernet, bezdrátové technologie). Příčinou je sdílené médium (vzduch), které může být obsazeno na určitém komunikačním kanálu jen jedním účastníkem a zbytek stanic čeká až se na ně dostane řada. Díky tomu je i složitější řízení stanic, proto je zpoždění dobou přístupu k médiu u některých bezdrátových technologií **velké**.

1.4 Latence vznikající v mezilehlých zařízeních

Mezilehlé zařízení je jakýkoliv aktivní prvek na cestě mezi koncovými zařízeními. Tato zařízení mají mnoho rozličných úkolů, svým rozsahem zahrnující různé vrstvy OSI modelu. Můžou například propojovat v jednom bodě více linek do různých směrů a sítí. Proto mezi nejdůležitější úkoly patří směrování a přepínání, tedy přeposílání datových jednotek nejkratší (nejvýhodnější) cestou k cíli. Mezi další neméně důležité funkce patří zesilování a obnova signálu, zajištění bezpečnosti a správy sítě.

Latence v mezilehlých zařízeních t_{MZ} se skládá z různých zpoždění, které jsou uvedena v následujících podkapitolách. V dalších oddílech jsou vypsána jednotlivá

mezilehlá zařízení, popis jejich činnosti a latence pro ně typická.

Zpoždění ve vstupní frontě

Je to doba, kterou rámec stráví ve vstupní vyrovnávací paměti (buffer), než jsou načteny všechny potřebné bity (hlavička, či celý paket). V případě změny přenosové rychlosti mezi vstupním a výstupním portem je potřeba načíst celý paket, v ostatních případech záleží na metodě přeposílání rámců (kapitola 1.4.2). Doba zpoždění ve vstupní frontě je rovna velikosti serializačního zpoždění t_s (kapitola 1.3.1) příchozí linky vztahované na počet bitů ukládaných do vyrovnávací paměti. Většinou se hodnota serializačního uvádí přímo v souvislosti s latencí aktivního zařízení (dle počtu zpracovávaných bitů), přestože její velikost je ovlivněna rychlostí linky a velikostí rámce.

Doba zpracovávání informace

Je to čas t_p , který zařízení potřebuje pro přesunutí paketu ze vstupu do výstupní fronty. Minimální hodnota závisí na výkonu zařízení a prováděných operacích (např. směrování, překlad adres, značkování pro QoS, filtrování portů, ...), vždy záleží na typu zařízení a jeho konfiguraci. Celková doba zpracování se zvyšuje se zvyšujícím se provozem – zatížením prvku. Každé zařízení má definovanou propustnost, která se zejména u levnějších prvků sítě nerovná maximálnímu zatížení všech portů. Pokud má zařízení 48 gigabitových portů, ale propustnost je 32 Gbit/s, poté zařízení v případě plného zatížení nebude schopné obsluhovat všechny porty. Například prvky v přístupové síti jsou určeny ke koncentraci provozu a neočekává se u nich plné simultánní vytížení všech portů.

Zpoždění v odchozích frontách

Doba strávená v odchozí frontě t_f je přímo závislá na aktuálním počtu paketů směřujících na stejný port (čekajících ve frontě před paketem). Při použití QoS je často použit jiný typ fronty než FIFO, díky tomu není možné dobu strávenou ve frontě exaktně určit. Více o době strávené v odchozí frontě je v kapitole 1.2.2.

1.4.1 Opakovač (repeater) a aktivní hub

Tyto nejjednodušší aktivní prvky pracují na první vrstvě OSI modelu. Jejich úkolem je regenerovat příchozí signál a zesílený jej odeslat na všechny porty, kromě portu ze kterého paket obdržely. Jelikož není třeba načítat celý rámec je zpoždění opakovače i hubu **zanedbatelné**, přibližně $0,68 \mu s$ (pro CentreCom MR820TR) [13].

1.4.2 Přepínač (switch)

Pracuje na linkové vrstvě OSI modelu, jeho úkolem je přepnutí rámce, dle MAC adresy na správný výstupní port. Pro každý port vytváří vlastní kolizní doménu, díky tomu snižuje počet zařízení sdílejících médium a zároveň tedy i vytíženost přenosové linky. Latence přepínače nezávisí pouze na rychlosti přepínacího pole, ale též na jeho nastavení a zatížení. Existují tři režimy práce přepínače z nichž je každý jinak rychlý.

- Cut-Trough – při tomto režimu se přijatý rámec nekontroluje a ihned po přijetí hlavičky s cílovou MAC adresou se odešle na výstupní port.
- Fragment Free (FF) – zde přepínač přijme prvních 64 B rámce, zkontroluje médium zda nedošlo ke kolizi a pokud je vše v pořádku, začíná přeposílat rámec na výstupní port.
- Store & Forward (S&F) – při této metodě se nejprve načte celý rámec, provede se kontrola CRC a teprve poté se odešle na výstupní port.

Nové switche firmy Cisco (řada 29XX) přepínají pouze metodou Store & Forward, u které se uplatní serializační zpoždění (kapitola 1.3.1) vstupní linky pro celý rámec. U zbylých dvou metod je to pouze serializační zpoždění pro prvních 18 B rámce při Cut-Trough, respektive 64 B při Fragment Free. Dále se uplatní náhodný charakter zpoždění ve frontách (kapitola 1.2.2) v případě, že je výstupní port blokován jinými daty.

Dokument [13] popisuje testování zpoždění různých přepínačů z provenience Cisco a vybrané výsledky jsou v tabulce 1.2. Celková velikost latence prvku (t_{MZ}) se zde skládá z doby potřebné na přepnutí již přijatého rámce na výstupní port (t_p) a hodnoty serializačního zpoždění pro příslušnou velikost rámce a linku o rychlosti 10 Mbit/s (pro 64 B paket je serializační zpoždění $51,2 \mu s$ a pro 1498 B je $1198,4 \mu s$).

Podobné hodnoty zpoždění, při srovnání s t_p předchozího měření, udává výrobce přepínače HP ProCurve 1700. Latence pro tento přepínač je maximálně $4,7 \mu s$ (v režimu Cut-Trough s frontou FIFO, velikostí rámce 64 B a rychlostí linky 100 Mbit/s) [14]. V dokumentu [15] popisujícím Cisco Nexus 5020, je pro tento přepínač uvedeno, že hodnota zpoždění pro všechny velikosti rámce nepřesahuje $3,2 \mu s$.

1.4.3 L3 switch

V posledních letech se do páteřních sítí prosazují L3² přepínače, které jsou rychlejší než klasické směrovače a zároveň přepínají rámce na základě IP adresy. Po příchodu rámce L3 přepínač přečte IP adresu, která je v zapouzdřeném rámci a dle záznamu ve své přepínací tabulce zjistí, na který port má rámec odeslat. V případě,

²layer 3 - pracuje na 3. vrstvě OSI modelu

	98 B rámec		1492 B rámec	
Zařízení (režim)	Δt_{MZ}	Δt_p	Δt_{MZ}	Δt_{pn}
Catalyst 1900 (FF)	71,6 μs	-	71,6 μs	-
Catalyst 1900 (S&F)	96 μs	7 μs	1210 μs	7,4 μs
Catalyst 2900 (S&F)	101 μs	14 μs	1210 μs	15 μs
Catalyst 3550 (L3)	118 μs	28 μs	1380 μs	168 μs

Tab. 1.2: Tabulka testovaného zpoždění pro různé switche (převzato z [13]).

že přepínač nemá IP adresu přiřazenou k portu, nebo se nejedná o zapouzdřený IP paket, přihází na řadu zabudovaný směrovač. Ten určí jak s rámcem naložit a tuto informaci si uloží i přepínač do přepínací tabulky [16].

Latence L3 přepínače (příklad Cisco 3550) je 118 μs pro rámec velikosti 98 B a 1380 μs pro rámec velikosti 1592 B. Opět je v této hodnotě započteno serializační zpoždění (1.3.1) pro linku rychlosti 10 Mbit/s a příslušnou velikost paketu [13].

Kromě L3 switchů existují též přepínače pracující na vyšších vrstvách (L4-7 switch), které provádí směrování na základě znalosti portů nebo aplikačních dat. Používají se například pro loadbalancing webových serverů, nebo pro filtrování provozu. Jejich zpoždění je ještě větší a zároveň těžko obecně definovatelné – vždy záleží na konkrétním použití.

1.4.4 Směrovač (router)

Základním úkolem směrovače je propojovat sítě používající různé technologie (Ethernet, WDM, xDSL, WiFi, ...), provádět překlad adres (NAT) a co nejlépe směrovat přicházející provoz. Ke směrování se používá směrovací tabulka a různé směrovací protokoly, což prodlužuje dobu paketu strávenou v routeru. Některé směrovače obsahují další funkce, kterými zastávají práci jiných zařízení: firewall, DHCP server, podpora VoIP, ...

Velikost celkové latence routeru závisí na mnoha faktorech, proto je velmi těžké určit zpoždění platné obecně. Vynecháme-li stochastickou část zpoždění, jako je zpoždění v odchozích frontách (kapitola 1.2.2) a celkové zatížení routeru, můžeme určit minimální hodnotu zpoždění – deterministickou část. Ta se skládá z doby nutné pro načtení celého rámce (serializační zpoždění příchozí linky – kapitola 1.3.1), doby potřebné pro nalezení informace v routovací tabulce a odeslání na výstupní port.

Podle testu páteřních směrovačů se minimální hodnoty latence pohybují mezi 10 – 20 μs (např. pro Cisco 12146 je minimální latence 17,7 μs), jedná se o měření při 40 B velikosti paketu a lince 2,5 Gbit/s. Průměrné hodnoty latence při smíšeném

internetovém provozu a rychlosti 2,5 Gbit/s dosahovaly velikosti od 65 do 252 μs , pro Cisco router byla průměrná latence 252 μs [17].

Test páteřních směrovačů pro síť IPv6 udává zpoždění pro směrovače značek Fujitsu, Hitachi, Juniper a Nec hodnoty zpoždění od 9 do 72 μs [19].

Další měření se uskutečnilo použitím Test boxů [18] a vložením 0 - 3 směrovačů mezi dva Test boxy. Průměrná naměřená hodnota latence pro směrovač Cisco 3630 byla 224 μs (pro 100 B paket) [4].

1.5 Shrnutí zpoždění

Jak je zobrazeno na úvodním obrázku 1.1, zdrojem zpoždění v síti je každá část sítě. Celkové zpoždění je dáno součtem zpoždění za jednotlivé části sítě (koncové stanice, linky a mezilehlá zařízení) – vyjádřeno rovnicí 1.4.

V případě podrobnějšího pohledu na síť rozlišíme i jednotlivé druhy zpoždění pro různé části sítě, tento úplný popis představuje rovnice 1.5. Ve většině typů sítě nejsou všechny zpoždění stejně velké, ba naopak jeden druh zpoždění je obvykle mnohem větší než ostatní. Konkretní případy velikosti zpoždění pro různé sítě jsou uvedeny v následujících kapitolách.

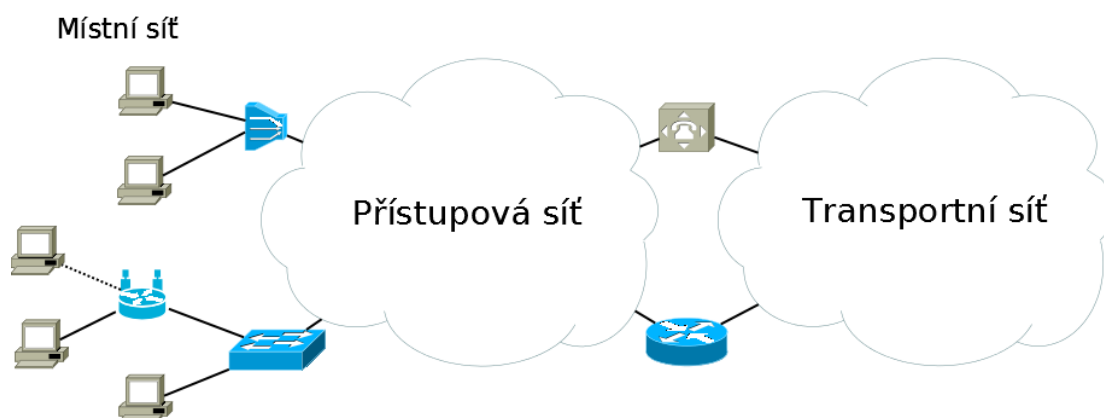
$$t = t_K + (n + 1) \cdot t_L + n \cdot t_{MZ} + t_{KZ}, \quad (1.4)$$

$$t = t_p + t_f + (n + 1) \cdot t_{rs} + n \cdot (t_s + t_p + t_f + t_{pm}) + t_j. \quad (1.5)$$

2 ZPOŽDĚNÍ V REÁLNÝCH SÍTÍCH

Počítačová síť je spojení několika počítačů komunikačními linkami za účelem sdílení výpočetních zdrojů a úložišť dat. Dnes nejrozšířenější síť je Internet, který využívá protokolovou rodinu TCP/IP. Pod TCP/IP (na druhé vrstvě OSI) mohou být implementovány různé technologie, např: Ethernet, WiFi, xDSL, SDH, (D)WDM, ...

Obecně má Internet stromovou strukturu, v důležitých částech sítě je však spojení zálohováno a vytváří v těchto místech neúplnou mesh topologii. Rozsáhlé sítě se dělí na část přístupovou a transportní (obrázek 2.1). Za pomoci přístupové sítě je uživatel připojen do páteřní (transportní) sítě, kde je informace směrována k cílové síti a koncovému uživateli. Obě části sítě (přístupová i transportní) jsou většinou vlastněny velkými společnostmi. Do vlastnictví uživatele, nebo připojené organizace patří takzvaná síť místní (LAN), která propojuje lokální zařízení. Místní síť je poté v jednom nebo více místech propojena k přístupové síti. Pokud má organizace v jednom místě více poboček vytváří takzvanou metropolitní síť (MAN), způsob jejího připojení k celosvětové síti (WAN) je však stejný – pomocí přístupové a transportní sítě [20].



Obr. 2.1: Rozdělení sítě na místní, přístupovou a transportní.

2.1 Zpoždění v místní síti

Nejčastěji používanou technologií v místní síti je Ethernet (IEEE 802.3) a WiFi (IEEE 802.11). Místní síť má velikost okolo 100 m, metropolitní síť maximálně několik desítek kilometrů, vzhledem k malému rozsahu sítě je možné zpoždění vzniklé šířením signálu zanedbat. Rychlosti linek se pohybují mezi 10 až 100 Mbit/s, díky čemuž může vzniknout serializační zpoždění maximálně 1,2 ms (pro velikost paketu

1 500 B). V síti se nachází zpravidla jeden směrovač a několik prepínačů, tyto můžou být největším zdrojem zpoždění, obzvláště pokud pracují v režimu Store & Forward. Pokud je stanice připojená bezdrátově (WiFi), je při velkém zatížení sítě nutné započítat zpoždění dobou přístupu k médiu a případně uvažovat nižší přenosovou rychlost, pokud je signál slabý nebo zarušený.

Celkové jednosměrné zpoždění t v lokální síti pro jednotlivé technologie (ethernet a WiFi) je uvedeno v tabulce 2.1. Hodnoty jsou změřené v malé lokální síti s jedním směrovačem, který funguje taktéž jako přístupový bod WiFi sítě. Obecně zpoždění v lokální, případně metropolitní síti je velmi malé, maximálně **v jednotkách milisekund**.

	technologie	t [ms]
místní sít'	Ethernet (IEEE 802.3)	0.057
	WiFi (IEEE 802.11)	0.385

Tab. 2.1: Tabulka velikostí zpoždění pro technologie použité v místní síti.

2.2 Zpoždění v přístupové síti

Úkolem přístupové sítě je připojit uživatele do páteřní sítě a agregovat provoz od více uživatelů do jedné přenosové linky. Na trase se může nacházet několik směrovačů a prepínačů, celková délka trasy je v desítkách kilometrů. Díky tomu je latence na aktivních prvcích i zpoždění rychlostí šíření malé. Pouze je důležité vzít v úvahu serializační zpoždění, závislé na rychlosti připojení a také dobu přístupu k médiu. Tyto parametry závisí především na technologii připojení, kterou nabízejí různí poskytovatelé připojení k internetu (ISP).

Připojení pomocí telefonní linky

Dlouho využívaným způsobem je přístup přes telefonního operátora. Možností využití telefonní linky je mnoho, počínaje vytáčeným připojením, přes síť ISDN a xDSL až po pronajaté okruhy. V dnešní době jsou nejrozšířenější přípojky ADSL, které dosahují příchozí rychlosti až 8 Mbit/s a odchozí do 1 Mbit/s. Tyto rychlosti způsobují serializační zpoždění až 12 ms (pro paket 1 500 B).

Pomocí pevného kabelového připojení

Další možností je přístup přes poskytovatele kabelové televize, nebo přímo poskytovatele internetu. Tyto přístupové sítě většinou využívají v přístupové části optický

kabel, díky čemuž můžou být rychlosti dle přání zákazníka (od jednotek Mbit/s až po 100 Mbit/s). Zpoždění je v těchto případech velmi malé.

Připojení bezdrátovou technologií

Poslední možností je využití poskytovatele bezdrátového internetu – ať už mobilního (GPRS, EDGE, CMDA), nebo WiFi. Zde jsou rychlosti nejpomalejší (do 1 Mbit/s, často jen 100 Kbit/s). K velmi výraznému zpomalení nastává při přístupu k médiu – je příčinou velkého zpoždění. U těchto sítí je latence počítána v desítkách až stovkách milisekund.

Srovnání jednotlivých technologií

Doby zpoždění jednotlivých technologií jsem otestoval měřením zpoždění k internetovým stránkám veřejného peeringového uzlu www.nix.cz, protože k tomuto uzlu má většina operátorů dobré připojení. Výsledky měření jsou pro uvedeny v tabulce 2.2 a je tedy možné porovnat velikosti zpoždění t a počet skoků n pro různé technologie připojení. Nejlepších hodnot zpoždění dosahuje pevné připojení kabelem, připojení pomocí ADSL a bezdrátovým mostem mají také dobré výsledky. Nejhorší výsledek je pro bezdrátové připojení pomocí GPRS, jehož hodnota zpoždění je několikanásobně větší než u ostatních přístupových sítí.

	způsob připojení	t [ms]	n
přístupové sítě	ADSL – telefonní linkou	7.853	7
	CESNET2 – pevné připojení kabelem	2.299	7
	GPRS – bezdrátový přenos dat	93.763	10
	síť Netbox – pevné připojení kabelem	2.839	6
	Bezdrátový most (Wi-Fi) do sítě ISP	7.769	10

Tab. 2.2: Tabulka velikostí zpoždění pro technologie použité v přístupových sítích.

2.3 Zpoždění v transportní síti

Transportní síť přenáší data mnoha uživatelů na velké vzdálenosti, proto jsou vybaveny kapacitními spoji (v řádu Gbit/s) – serializační zpoždění je v tomto případě zanedbatelné. Oproti tomu je významné zpoždění rychlostí šíření, které je přímo úměrné k délce fyzické cesty. Teoretické zpoždění rychlostí šíření na trase Brno – Los Angeles (přímá vzdálenost 10 000 km) se bude pohybovat okolo 50 ms. Na tuto vzdálenost jsem pomocí programu *Traceroute* zjistil 17 skoků, což znamená

17 směrovačů přidávajících zpoždění – celková latence směrovačů v jednotkách milisekund. V porovnání je tedy doba zpoždění aktivních prvků oproti zpoždění rychlostí šíření malá (platí pro velké vzdálenosti).

V tabulce 2.3 jsou uvedeny výsledky měření zpoždění t a počtu skoků n pro čtyři města různě vzdálená od Brna, vzdálenost byla zjištěna pouze přímá l_{prima} pomocí online map. Měření hodnot proběhlo ze sítě CESNET2 a je shodné s výsledky v kapitole 4.5.

	město	l_{prima} [Km]	t [ms]	n
transportní sítě	Vídeň	110	1,46	8
	Stockholm	1133	17,79	12
	Los Angeles	9752	89,42	17
	Sydney	15 963	168,44	18

Tab. 2.3: Tabulka velikostí zpoždění pro různé délky transportní sítě

3 NÁSTROJE K MĚŘENÍ ZPOŽDĚNÍ A TRASY

Pro měření zpoždění bylo vyvinuto mnoho aplikací, online appletů a také hardwarových zařízení. Metodika a názvosloví pro měření zpoždění v síti internet je definována v RFC 1242. V této kapitole jsou základní nástroje pro měření zpoždění a počtu skoků podrobněji popsány a vysvětleno je jejich použití. Výpis určitě není kompletní, protože podobných programů existuje velké množství. Díky tomu se nemusíme omezovat na jeden způsob měření a dle potřeby použít nejlépe vyhovující řešení. Než však začneme zkoumat výsledky je třeba si uvědomit jakým způsobem je latence měřena a co vše výsledek ovlivňuje.

3.1 Vlastnosti jednotlivých měření

Před měřením je nutné si rozmyslet, co je cílem měření a poté vybrat vhodný nástroj. Většinou se zaměřujeme na určitý typ služby a dle toho volíme vrstvu OSI modelu pro kterou provádíme měření. Záleží také na protější stanici, vůči které měření provádíme. Tato stanice musí daný nástroj podporovat, respektive komunikovat na dané vrstvě. Úspěšnost měření ovlivňují také mezilehlá zařízení, která nemusí vždy naši zprávu přenést. Dále je důležité vědět, že každý program může výsledky podávat jiným způsobem. Velký rozdíl je například mezi jednocestně a obousměrně změřeným zpožděním.

3.1.1 Měření dostupnosti a zpoždění na různých vrstvách OSI modelu

Nejčastěji se zpoždění a dostupnost zjišťuje na třetí vrstvě OSI modelu pomocí programu Ping. Jsou však případy, kdy je nutné použít i jiný nástroj, například pokud síťová vrstva pracuje v pořádku a problém je na některé vyšší vrstvě. V odrážkách jsou vrstvy OSI modelu a příklad aplikace umožňující měřit zpoždění nebo dostupnost služeb na této vrstvě.

- 2. vrstva – L2 traceroute – slouží k zjištění zařízení pracujících na linkové vrstvě (přepínače), pracuje pouze se zařízeními firmy Cisco pokud je na nich povolen protokol CDP (Cisco discovery protocol).
- 3. vrstva – Ping – ICMP dotaz na vzdálenou stranu.
- 4. vrstva – Traceroute (TCP) – dotaz na určitý port a k němu navázaný protokol.
- 7. vrstva – Telnet – pouze k ověření zda druhá strana poslouchá na daném portu (23) a je možno s ní komunikovat na aplikační vrstvě.

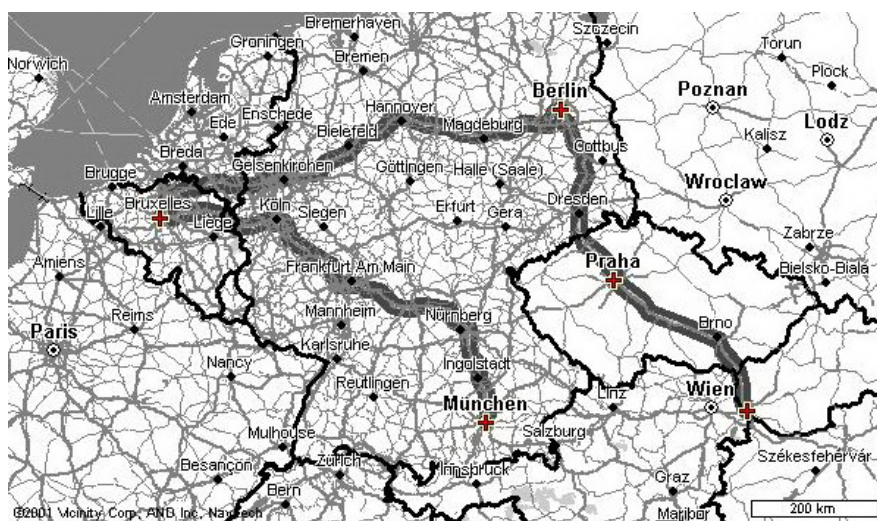
3.1.2 RTT versus jednocestné zpoždění

Round time trip (RTT), nebo také round trip delay (RTD) je hodnota zpoždění změřená jednou stanicí. Velikost tohoto zpoždění v sobě zahrnuje cestu informace k cílové stanici, dobu jejího zpracování v cílové stanici a cestu zpět. Získáme tedy přibližně dvojnásobnou hodnotu zpoždění než při jednosměrném měření. Přesnou latenci pro jeden směr, ale nezískáme, protože zpoždění může být asymetrické.

Oproti tomu jednocestné zpoždění (one-way delay) je měřeno zdrojovou i cílovou stanicí, a proto dostaneme výsledek pro žádaný směr. Jeho měření má oproti RTT dvě velké nevýhody: první je nutnost měřit zpoždění zároveň na dvou stanicích, z nichž jedna je zpravidla vzdálená. Druhou nevýhodou je přesná časová synchronizace těchto stanic, která je složitá kvůli potřebné přesnosti (desítky mikrosekund).

3.1.3 Přímá vzdálenost versus fyzická vzdálenost

V předchozí kapitole je zmíněno, že zpoždění rychlostí šíření signálu je přímo úměrné délce fyzické cesty. Tuto vzdálenost však neznáme, pokud známe geografickou polohu stanic, je možné zjistit pouze přímou vzdálenost mezi místy. Fyzická vzdálenost je 1,2 – 5 krát větší než přímá, průměrně je asi 2,5 krát delší (dle dat [4]). Je to především tím, že kabely (optické i metalické) jsou nejčastěji pokládány podél dálnic a železničních koridorů. Například přímá vzdálenost Brno – Praha je 187 Km, po dálnici je tato vzdálenost 210 Km, ale po optickém kabelu, který využívá síť CESNET2, je to přibližně 310 Km. Když k tomu připočítáme, že paket nemusí být směřován nejkratší cestou, může se například stát, že cesta mezi Bratislavou a Mnichovem je 5 krát delší než přímá cesta – viz obrázek 3.1 [4].



Obr. 3.1: Mapa směřované cesty mezi Bratislavou a Mnichovem (převzato z [4])

3.2 Program Ping

Základním nástrojem k měření zpoždění je program Ping (Packet InterNet Gro-per), který je implementován ve všech operačních systémech. Program Ping se spustí napsáním příkazu `ping` do příkazového řádku nebo konzole operačního systému počítače, následovaného IP adresou stanice k níž chceme změřit zpoždění. V MS Windows program Ping po svém spuštění vyšle 4 ICMP dotazy a poté ukáže statistiku úspěšnosti. Ping v OS Linux vysílá UDP paket a to tak dlouho, dokud není zastaven uživatelem. V obou operačních systémech je možné tato a další nastavení změnit pomocí parametrů použitých společně s příkazem. Výpis statistik v Linuxu zobrazuje zpoždění v řádu mikrosekund, v MS Windows je měření pouze v řádu milisekund. Pro zvýšení přesnosti měření v MS Windows je možné použít programy podobné programu Ping, např. *True Ping*.

Program Ping používá ke své činnosti protokol ICMP, pomocí nějž dotazuje vzdálenou stanici. Proto jsou v následující podkapitole uvedeny vlastnosti tohoto protokolu.

3.2.1 Protokol ICMP

Internet control message protocol (ICMP) je protokol řídicích zpráv, sloužící k získání informací o chybách při přenosu datagramů. ICMP obsahuje několik typů odpovědí, díky nimž je možné určit, proč nebylo možné paket doručit k cíli. Ze zprávy *Destination unreachable* se lze dozvědět jestli je příčinou chyby nedostupná síť, stanice, nebo port (tabulka 3.1). ICMP protokol, potažmo Ping jsou velmi využívány také jako diagnostický nástroj pro správce sítí. Více o protokolu ICMP a podrobnosti o používaných odpovědích lze nalézt v RFC 792 a 1256.

3.2.2 Princip fungování programu Ping

Proces ICMP dotazů proběhne podle následujících kroků a nakonec vypíše hodnotu RTT zpoždění.

1. Zdroj vygeneruje ICMP zprávu typu 8 (Echo request).
2. ICMP zpráva se zapouzdří do rámce a je odeslána na adresu cílové stanice.
3. Zdroj si uloží lokální čas, ve který byla zpráva odeslána.
4. Každý uzel na lince zkontroluje, zda adresa odpovídá jeho síťové adrese. Pokud tomu tak není, je zpráva přeposlána dále dle směrovací tabulky.
5. Cíl přijme IP datagram, otevře ICMP zprávu a uloží si pro něj důležité informace.
6. Cíl vygeneruje zprávu s odpovědí (typ 0 – Echo reply), kterou odešle na zdrojovou adresu přijatého ICMP dotazu.

Kód	Obsah zprávy
0	<i>Network unreachable</i> = odpověď od routeru, když pro danou síť není záznam ve směrovací tabulce.
1	<i>Host unreachable</i> = odpověď od routeru, když stanice přímo připojené sítě neodpovídá.
2	<i>Protocol unreachable</i> = generováno, když transportní protokol není podporován transportní vrstvou cíle.
3	<i>Port unreachable</i> = vytvořeno, když není možné zprávu doručit transportní vrstvě na daném portu.
4	<i>Fragmentation needed and DF set</i> = pokud je nutno paket fragmentovat, ale příznak Don't Fragment je nastaven.
5	<i>Source route failed</i> = pokud paket nelze doručit adrese zadané jako zdroj zprávy.
6	<i>Destination network unknown</i> = neznámá cílová síť.
7	<i>Destination host unknown</i> = odpověď od routeru, pokud cílová stanice neexistuje.

Tab. 3.1: Vybrané kódy ICMP zpráv pro Destination unreachable (podle [10])

- Nový datagram je směrován zpět k výchozí stanici, kterou je přijat. Teprve poté se odečte čas strávený cestou – zpoždění. Tento údaj je spolu s úspěšností vypsán uživateli programu [23].

Pokud se stane že Ping není úspěšný, příčin neúspěchu může být více. Například z důvodu špatné IP adresy, nedostupnosti cílové stanice, špatného směrování a nebo kvůli blokování ICMP zpráv.

3.2.3 Doba života paketu (TTL)

Důležitým parametrem IP paketu a tedy i ICMP zpráv je doba života – počet skoků, než bude paket zahozen. Každý směrovač nebo stanice, přes kterou paket projde sníží TTL o jedna. Pokud známe hodnotu TTL na začátku a na konci komunikaci, je možné snadno dopočítat, kolika směrovači paket prošel.

Výchozí hodnotu TTL vzdálené stanice je možné zjistit z veřejně dostupných tabulek hodnot pro jednotlivé operační systémy, např. v [24]. Málokdy bohužel známe operační systém vzdálené stanice a také může být výchozí hodnota TTL uživatelem změněna.

3.2.4 Ping a možnost měření šířky pásma

Velmi zajímavým nástrojem je program *Bping* (Bandwidth ping), který dokáže přibližně změřit přenosovou rychlost linky. Jedná se o upravený program Ping, který vysílá pakety o různých velikostech. Jelikož se na trase minimálně jednou uplatňuje serializační zpoždění (kapitola 1.3.1), je možné na základě rozdílné velikosti zpoždění pro různé velké pakety dopočítat přenosovou rychlost trasy [25].

3.3 Programy Tracert a Traceroute

Tracert a *traceroute* jsou programy vypisující všechny uzly (směrovače) na trase k cíli (zadané IP adrese). Program pracuje na principu opakování dotazu Ping s postupně zvyšovaným TTL. Při průchodu každým směrovačem je hodnota TTL snížena o jedna a v případě dosažení nuly, je zpráva zahozena a odesílateli poslána ICMP chybová zpráva. V dalším kroku, zdroj vytvoří stejnou zprávu pouze se změněným TTL – zvýší se o jedna a tím se dostane k následujícímu směrovači na trase. Z výpisu programu získáme podrobný přehled o počtu směrovačů na trase (tzv. hops) a velikost RTT zpoždění k nim. Nevýhodou programu je neposílání odpovědí některými směrovači.

Oba programy se spouští zadáním příslušného příkazu (**tracert** nebo **traceroute**) do příkazové řádky nebo konzole operačního systému následovaným cílovou adresou. Tracert pracuje v MS Windows a používá ICMP zprávy, kdežto Traceroute pracuje pouze v OS Linux a posílá UDP dotazy.

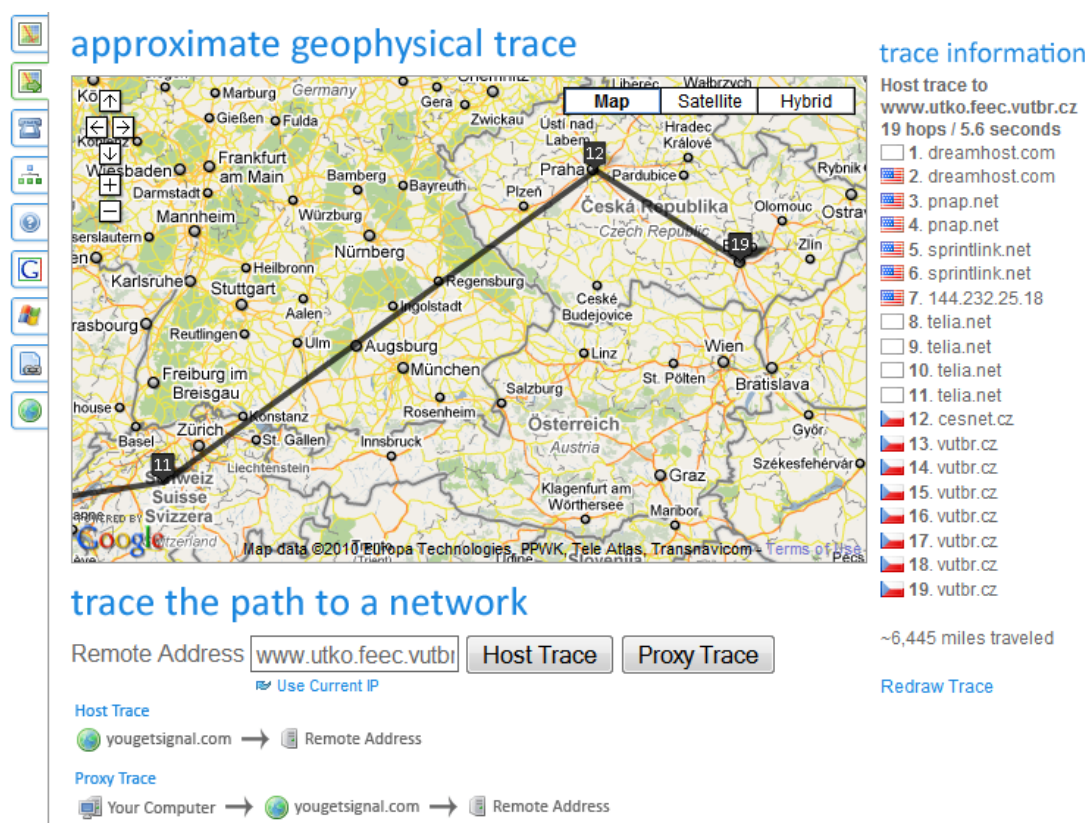
3.3.1 Varianty traceroute v linuxu

Program *Traceroute* umožňuje modifikovat měření, změnou jeho výchozích hodnot pomocnými parametry. Jedná se například o používaný typ protokolu na výběr je ICMP, TCP nebo výchozí UDP, dále také o počet dotazů (výchozí je 3) a maximální velikost TTL.

Dále existují i jiné programy pro měření trasy, především v Linuxu (Ubuntu 9.10) je možné nalézt programy *Traceroute-nanog*, *Tracepath* a *Tracert*. Ty se od Traceroute liší způsobem výpisu trasy, použitým protokolem nebo časy opakování dotazů. Kombinací těchto programů a jejich nastavení je možné získat více informací o celé cestě paketu k cíli. Podrobnější informace o jednotlivých programech a jejich nastaveních je možné najít v manuálech k těmto programům.

3.4 Aplikace zobrazující trasu na mapě

Na internetových stránkách [26], [27] a [28] jsou online aplety, umožňující zobrazit trasu zjištěnou programem *Traceroute* na mapě světa. Po zadání požadované cílové adresy se spustí na serveru webové stránky příkaz `traceroute` a výsledky jsou vypisovány na příslušnou webovou stránku (viz obrázek 3.2). Zároveň aplikace zobrazuje trasu na mapě, přesněji přímé spojení mezi zjištěnými uzly. Polohu těchto uzlů aplikace zjistí podle vlastníka IP adresy, což je ale nepřesné (směrovač se může nacházet jinde než majitel IP adresy).



Obr. 3.2: Zobrazení trasy na mapě pomocí aplikace ze stránky [26].

3.5 Zařízení Test box

Test box, připravený organizací RIPE NCC je hardwarový nástroj na testování připojení. Na rozdíl od předchozích programů, se jedná o samostatný hardware, který slouží pouze k měření. Test box umožňuje měřit přenosovou rychlost, ztrátovost, kolísání zpoždění a jednosměrné zpoždění, což aplikace spuštěné z jedné stanice neumožňují. Po celém světě je rozmístěno okolo dvou set těchto zařízení, data z nich je možné si zobrazit na webových stránkách a případně si nechat vygenerovat grafy.

Pro časovou synchronizaci všech Test boxů se používá signálu GPS, který zároveň slouží k určení polohy Test boxu. Statistická chyba zařízení je $10 \mu s$ [18].

4 MĚŘENÍ ZPOŽDĚNÍ V REÁLNÉ SÍTI

K ověření popsaných teoretických vlastností IP sítí jsem provedl několik různých měření zpoždění v reálné síti. Zvolil jsem největší světovou síť Internet, ale převážná většina měření probíhala v síti patřící sdružení Cesnet.

4.1 Síť sdružení Cesnet

Vysoké školy a Akademie věd ČR založili v roce 1996 sdružení Cesnet, jehož cílem je rozvoj páteřní akademické sítě. Síť nese název CESNET2 a je finančně podporována z členských příspěvků a grantů. CESNET2 propojuje univerzitní města vysokorychlostními datovými okruhy, topologie sítě je složena z kruhů procházejících omezeným počtem měst. Páteř sítě tvoří optický přenosový systém na němž je nasazeno DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) a na třetí vrstvě je IP/MPLS (Multiprotocol Label Switching).

CESNET2 vytváří vlastní autonomní systém číslo 2852 a je v peeringových uzlech propojen s jinými autonomními systémy. Cesnet je členem evropského konsorcia Géant vytvářející evropskou akademickou síť, proto je síť propojena s akademickými sítěmi okolních států. Celá síť CESNET2 je bohatě dokumentovaná a je možné zjistit mnoho informací o topologii sítě i parametrech jednotlivých linek. Pro moji další potřebu jsem v dokumentaci vyhledal délky optických kabelů mezi jednotlivými městy. Vzdálenosti v kilometrech jsem zapracoval do mapy topologie sítě CESNET2 (obrázek 4.1) a také použil v dalších měřeních [29].

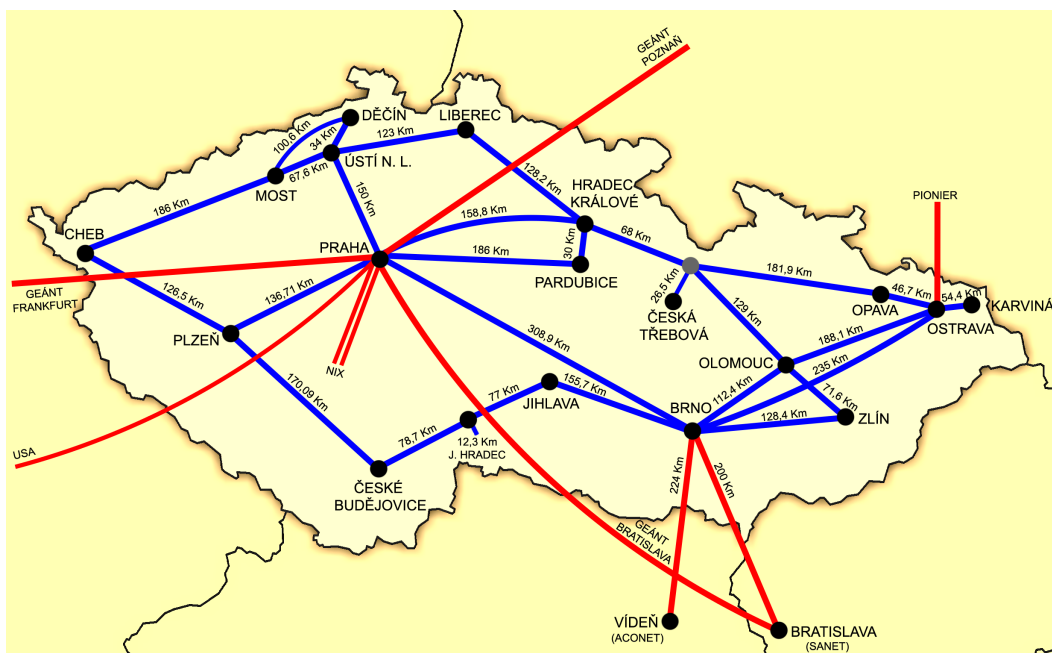
4.2 Způsob měření

Cílem měření bylo zjistit co nejpřesněji hodnotu zpoždění mezi Brnem a ostatními městy v síti CESNET2, ale také dalšími místy nejen v České republice. Protože nebylo možné ovládat vzdálenou stanici, ke které bylo měřeno zpoždění, bylo nutné měřit hodnotu obousměrného zpoždění (RTT). Toto jsem měřil programem Ping pomocí ICMP dotazů (Echo Request) na vzdálenou stranu.

K podrobnějšímu zkoumání trasy je dobré znát počet mezilehlých zařízení a jejich umístění. Na to jsem použil programy pro zjišťování trasy.

4.2.1 Konfigurace a způsob připojení měřícího počítače

Měření jsem provedl z notebooku (procesor Intel Core Duo 1,7 GHz, RAM 2048 MB, síťová karta 10/100 Mbit/s) s operačním systémem Ubuntu 9.10. Počítač byl připojen UTP kabelem v areálové knihovně FEKT na Purkyňově 118 v Brně.



Obr. 4.1: Délka optických kabelů mezi jednotlivými městy v síti CESNET2 (v Km).

Měření proběhla sedmkrát v různých pracovních dnech a hodinách. Při každém měření jsem použil předpřipravené bash skripty. Tyto skripty obsahovaly pole adres vzdálených uzlů a příkazy, které se sekvenčně prováděly pro každou adresu a výsledky zapisovaly do souboru. Použité skripty je možné najít na příloženém CD.

Ve skriptech je spouštěn program *Ping*, kterým byla zjištěna doby odezvy. Vždy bylo odesláno minimálně 20 dotazů Echo Request a z výsledků těchto měření byla použita nejnižší hodnota. Ke zjištění trasy jsem použil program *Traceroute*, který vypsal počet skoků k cílové adrese. Protože v některých případech výchozí nastavení tohoto programu (zprávy UDP) nedávalo vhodné výsledky, bylo využito i jiných typů zpráv (ICMP a TCP) a také programu *Traceroute-nanog*.

4.3 Měření zpoždění k uživatelům sítě CESNET2

Pro významná univerzitní města v České republice jsem změřil dobu odezvy mezi Brnem a tímto městem. Jako adresy vzdálených stanic jsem použil webové adresy organizací připojených k síti CESNET2. Pokud tyto adresy nereagovali na Ping vyhledal jsem adresu jiného vnitřního serveru, který na ICMP dotazy odpovídal. V případě opakovaného neúspěchu jsem vybral jinou organizaci ve stejném městě, v případě malého významu města jsem jej vynechal. Pro dvě organizace jsem zjistil, že webové stránky organizace se nenacházejí v síti CESNET2, a proto jsem je z měření vyloučil.

Změřené hodnoty obousměrného zpoždění t_{RTT} a počet skoků n jsou pro každou dostupnou organizaci v daném městě uvedeny v tabulce 4.1. Velikost jednosměrného zpoždění t byla získána rozpůlením hodnoty obousměrného zpoždění (viz rovnice 4.1). V případě nesymetrického zpoždění může být skutečná hodnota jednosměrného zpoždění odlišná, v našem případě ale předpokládám symetrické zpoždění.

$$t = \frac{t_{\text{RTT}}}{2}. \quad (4.1)$$

Doba obousměrného zpoždění

Pro adresy vzdálených stanic, které reagují na ICMP zprávy nebyl problém změřit dobu obousměrného zpoždění. Jak je uvedeno výše, měření byla provedena několikrát, z důvodu zjištění minimálního zpoždění mezi stanicemi. Minimální zpoždění bylo použito kvůli eliminaci zpoždění vzniklého zatížením přenosových prvků. Pravděpodobně tato chyba nebyla úplně eliminována, protože měření probíhala během pracovního dne, kdy jsou linky a uzly hodně zatížené. Doufejme ale, že hlavní výkyvy byly ve výsledcích potlačeny.

4.3.1 Výpočet doby zpoždění na jeden skok

Dobu zpoždění pro jeden prvek na trase je těžké teoreticky určit, protože je závislá na mnoha nejasně definovatelných parametrech. Každé mezilehlé zařízení je jiného typu a výrobce, proto není známá obecně platná velikost latence. Dalším problémem je aktuální zatížení prvků a zpoždění dobou strávenou čekáním ve frontě. A v neposlední řadě tuto neurčitost zvyšuje neznámý počet nezjištěných zařízení – pracujících na první a druhé vrstvě OSI modelu. Tato zařízení nejsou zahrnuta v zjištěném počtu skoků n .

Cílem tohoto měření a následného výpočtu bylo určit obecně platnou (obvyklou) hodnotu latence pro jeden skok. Jak je napsáno výše, do hodnoty tohoto zpoždění je započítána i latence případných přepínačů, rozbočovačů a zesilovačů.

K výpočtu byla použita známá délka optického kabelu mezi městy l_{skut} (obrázek 4.1), konstanta zpoždění dobou šíření signálu $c_{\text{rs}}=5,13$ ns/Km, počet skoků n a samozřejmě změřená doba jednosměrného zpoždění t . Zanedbána byla délka kabelů v síti výchozího a cílového města a doba zpracování informace vzdálenou stanicí.

Nejprve byla vypočítána průměrná doba zpoždění na jeden skok t_{MZ} pro každé měření zvlášť. Od doby jednosměrného zpoždění t je odečten skutečný počet kilometrů l_{skut} vynásobený konstantou pro dobu šíření signálu optickým kabelem c_{rs} , to vše je poděleno počtem mezilehlých zařízení (počet skoků n zmenšený o jedna). Pro každé město tedy byla za použití rovnice 4.2 vypočítána hodnota ideálního zpoždění

město	doménové jméno	l_{skut} [km]	t_{RTT} [ms]	n [-]	t [ms]	t_{Mz} [ms]
Olomouc – KMO	www.ok-olomouc.cz	112,4	3,045	6	1,523	0,189
Olomouc – UPOL	www.upol.cz	112,4	4,540	8	2,270	0,242
Olomouc – VKOL	www.vkol.cz	112,4	3,043	8	1,522	0,135
Zlín	www.utb.cz	128,4	2,009	5	1,005	0,086
Jihlava	www.vspj.cz	155,7	2,769	8	1,385	0,084
Ostrava – VŠB	vpn.vsb.cz	235,0	3,125	5	1,563	0,089
Ostrava – OU	www.osu.cz	235,0	3,542	6	1,771	0,113
Ostrava – SVKOS	www.svkos.cz	235,0	3,795	7	1,898	0,115
Jindřichův Hradec	www.fm.vse.cz	245,0	4,664	7	2,332	0,179
Česká Třebová	ct.upce.cz	267,9	5,888	5	2,944	0,392
Opava	www.slu.cz	281,7	3,762	7	1,881	0,073
Karviná	elearning.opf.slu.cz	289,4	4,053	7	2,027	0,090
Praha – VŠCHT	vpn.vscht.cz	308,9	4,165	8	2,083	0,071
Praha – AMU	www.amu.cz	308,9	4,150	10	2,075	0,054
Praha – AVU	www.avu.cz	308,9	4,401	10	2,201	0,068
Praha – AV	www.cas.cz	308,9	4,289	10	2,145	0,062
Praha – ČVUT	www.cvut.cz	308,9	4,148	7	2,074	0,082
Praha – ČZU	www.czu.cz	308,9	5,726	7	2,863	0,213
Praha – UK	supercomp.ruk.cuni.cz	308,9	4,189	8	2,095	0,073
Praha – VŠE	www.vse.cz	308,9	4,921	12	2,461	0,080
Hradec Králové – UK	www.faf.cuni.cz	309,4	6,309	6	3,155	0,313
Hradec Králové – KHK	www.knihovna.hk	309,4	6,223	7	3,112	0,254
České Budějovice – ČBVK	www.cbvk.cz	311,4	4,161	5	2,081	0,121
České Budějovice – JČU	www.jcu.cz	311,4	3,865	6	1,933	0,067
České Budějovice – VŠERS	www.vsiers.cz	311,4	3,925	5	1,963	0,091
Pardubice	www.upce.cz	339,4	5,933	5	2,967	0,306
Liberec	www.vslib.cz	437,6	6,540	6	3,270	0,205
Plzeň – FN	www.fnplzen.cz	445,6	6,010	8	3,005	0,103
Plzeň – UK	www.lfp.cuni.cz	445,6	5,892	7	2,946	0,110
Plzeň – ZČU	www.zcu.cz	445,6	5,767	7	2,884	0,100
Ústí nad Labem – SVKUL	www.svkul.cz	458,9	5,673	6	2,837	0,096
Ústí nad Labem – UJEP	www.ujep.cz	458,9	5,277	6	2,639	0,057
Děčín	www.dc.fd.cvut.cz	492,9	5,644	6	2,822	0,059
Most	www.most.ujep.cz	526,5	6,301	7	3,151	0,075
Cheb	fennel.fek.zcu.cz	572,1	7,036	8	3,518	0,083
průměr:						0,129
medián:						0,091
minimum:						0,005
maximum:						0,392

Tab. 4.1: Tabulka změřeného zpoždění a počtu skoků k dané adrese.

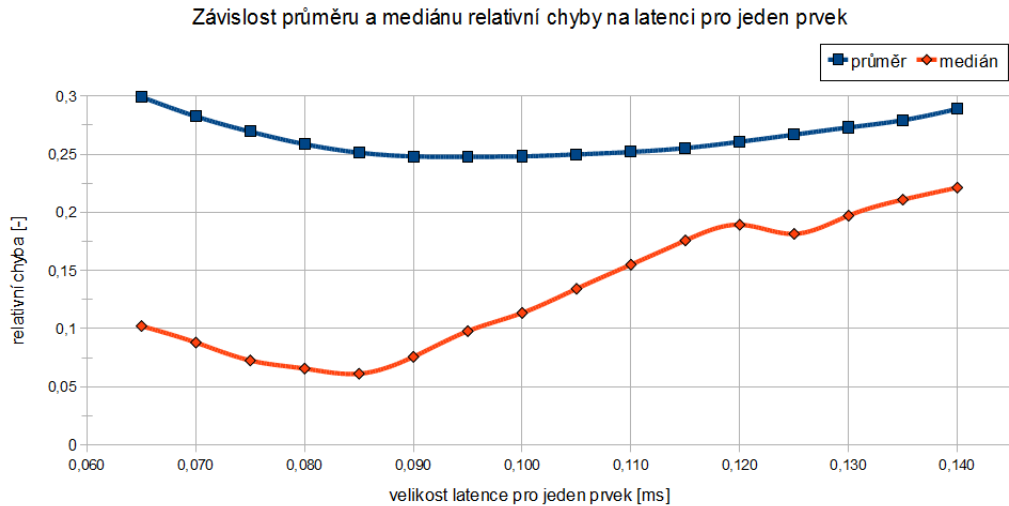
na jedno mezilehlé zařízení. Ze souboru výsledků byl vypočítán průměr, medián, minimum a maximum. Z těchto informací jsem zvolil rozmezí 0,065 ms až 0,140 ms, jako vstupní hodnoty k dalšímu výpočtu velikosti zpoždění na jeden skok.

$$t_{MZ} = \frac{t - l_{skut} \cdot c_{rs}}{n - 1}. \quad (4.2)$$

Pro 15 hodnot zpoždění ve zvoleném rozsahu byla pro každé měření vypočítána relativní chyba δ vypočítané vzdálenosti. Výsledky těchto výpočtů najdete v příloze v tabulkách A.1, A.2. Výpočet relativní chyby δ je proveden pomocí vztahu 4.3, kdy je absolutní hodnota rozdílu vypočítané l_{vypoc} a skutečné vzdálenosti l_{skut} podělena vzdáleností skutečnou. Vypočítaná vzdálenost je získána dle vztahu 4.4 pro aktuální město a hodnotu zpoždění na jedno mezilehlé zařízení t_{MZ} (platí vždy pro celý sloupec).

Pro každý sloupec je následně spočítán průměr a medián relativních chyb. Průměry a mediány jsou vyneseny do jednoho grafu 4.2 v závislosti na hodnotě zpoždění pro mezilehlá zařízení. Pro zjištění ideální průměrné, nebo střední hodnoty latence na jeden skok můžeme z grafu odečíst místo, kde je křivka nejbližší ose x. Pro průměrnou hodnotu relativní chyby je tato hodnota přibližně **0,095 ms** a pro medián relativních chyb ideální hodnota zpoždění na mezilehlý prvek rovna **0,085 ms**.

$$\delta = \frac{|l_{vypoc} - l_{skut}|}{l_{skut}}. \quad (4.3)$$



Obr. 4.2: Graf průměrů a mediánů přesností pro různé doby zpoždění na jedno mezilehlé zařízení, pro různé organizace ze sdružení Cesnet.

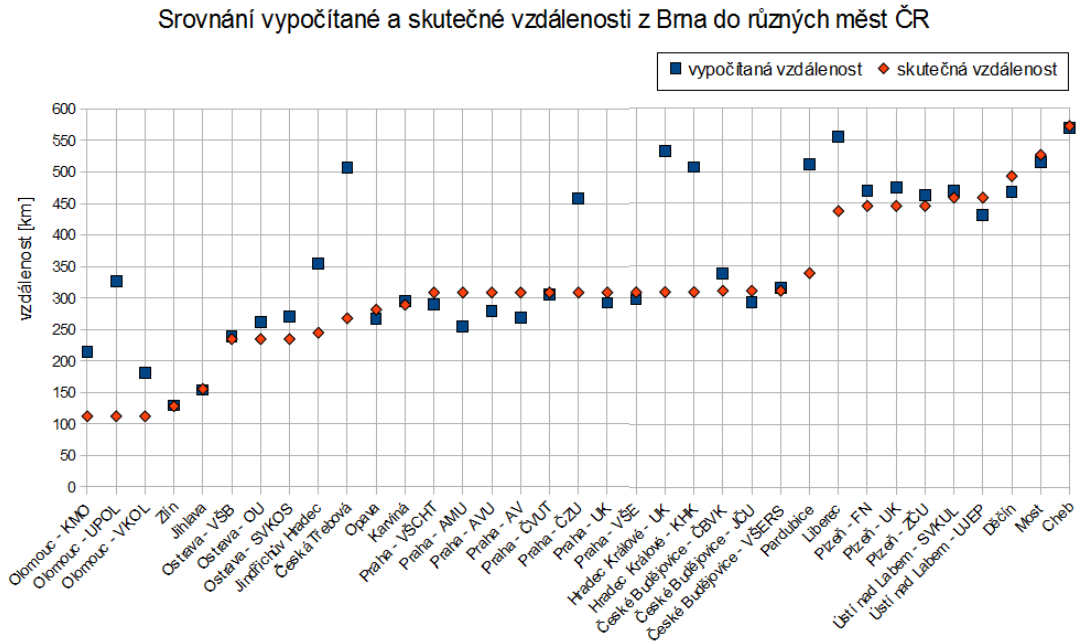
4.3.2 Výpočet délky trasy kabelu z naměřených hodnot

Zjištěná doba zpoždění na jedno mezilehlé zařízení (minimum pro medián) $t_{MZ} = 0,085$ ms posloužila také ke zpětnému výpočtu délky trasy kabelu. Tento výpočet (pokud známe charakteristickou dobu zpoždění na jeden prvek pro danou síť) není obtížný a lze jej využít například při zjišťování fyzické pozice stanice v síti.

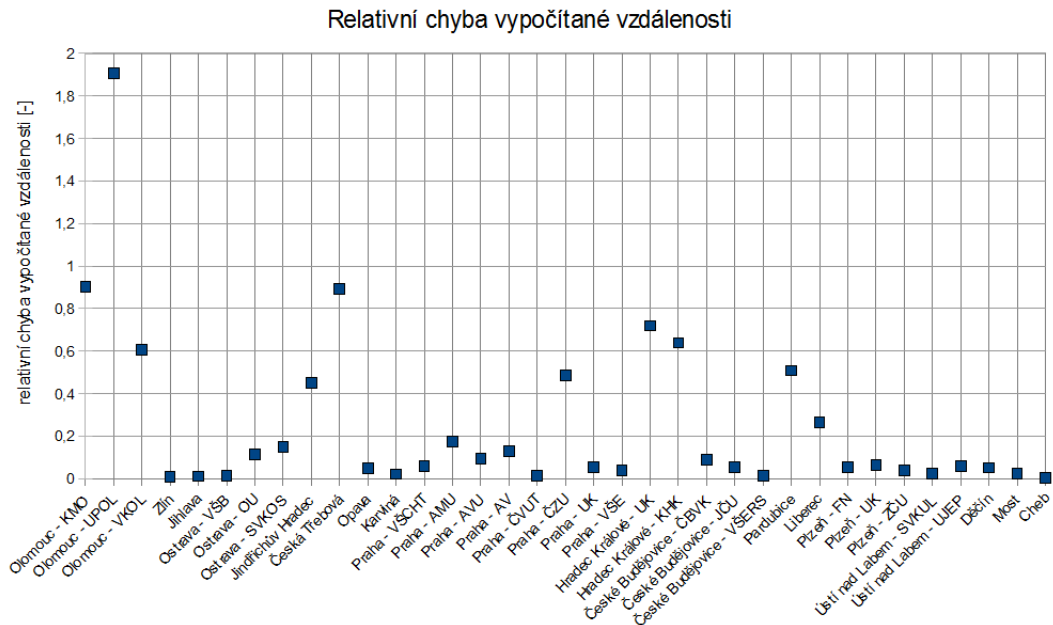
Dle rovnice 4.4 se odečte od změřeného jednosměrného zpoždění t doba zpoždění na jedno mezilehlé zařízení t_{MZ} vynásobená počtem stanic mezi koncovými zařízeními $(n - 1)$. Tento výpočet je následně vydělen konstantou doby zpoždění na jeden kilometr optického kabelu c_{rs} . Nejlepších výsledků dosáhneme opět s minimální změřenou hodnotou zpoždění, kdy jsou eliminovány veškeré stochastické zdroje zpoždění.

Vypočtené hodnoty najdeme v tabulce 4.2 a zároveň jsou spolu se skutečnou délkou kabelů l_{skut} vyneseny do grafu 4.3, který slouží k porovnání přesnosti. Další sloupec v tabulce 4.2 obsahuje relativní chybu měření δ , vypočítanou dle vztahu 4.3. Jednotlivé relativní chyby pro každé měření jsou vyneseny do grafu 4.4. Na konci tabulky jsou uvedeny některé statistické hodnoty (průměr, medián, minimum, maximum a směrodatná odchylka) pro soubor vypočtených relativních chyb, postup výpočtu statistických dat například dle [33].

$$l_{vypoc} = \frac{t - (n - 1) \cdot t_{MZ}}{c_{rs}}. \quad (4.4)$$



Obr. 4.3: Graf vypočítané a skutečné délky cesty, pro organizace ze sdružení Cesnet.



Obr. 4.4: Graf relativní chyby vypočítané vzdálenosti, pro organizace ze sdružení Cesnet.

4.3.3 Srovnání skutečné délky kabelu s přímou vzdáleností mezi městy

Často je vhodné znát přibližnou délku kabelu mezi stanicemi a pokud známe pouze polohu míst, můžeme vycházet ze statistiky poměru přímé a skutečné vzdálenosti $\frac{l_{\text{prima}}}{l_{\text{skut}}}$. V posledním sloupci tabulky 4.2 je tento poměr uveden. Na posledních řádcích tabulky jsou ony statistické hodnoty, ze kterých by bylo možné vycházet, ideální by však byl větší počet hodnot. Průměr, medián a směrodatná odchylka byly počítány pro jednotlivá města, neboť vícenásobné započítání jednoho města může ovlivnit výsledky. Obecně vzato výsledky říkají, že v případě sítě podobné síti CESNET2 (jeden autonomní systém, topologie více propojených kruhů) je skutečná délka kabelu dvojnásobná oproti přímé vzdálenosti.

4.4 Měření doby odezvy k prvním uzlu v městě

Toto měření bylo provedeno s cílem zpřesnit předchozí měření. Vždy byl vybrán první první síťový prvek, který se nacházel již v cílovém městě. Tím bylo z měření vyloučeno několik koncových uzlů a linek, nacházejících se ve stejném městě a zároveň eliminováno zpoždění v místní síti vzdáleného města.

Adresy vzdálených uzlů byly získány z výpisu programů *Traceroute* a *Traceroute-nanog*, vygenerované při předchozím měření v kapitole 4.3 a uložené na příloženém

CD. V případě, že prvním uzlem v daném městě byla doména některé organizace, je zpoždění měřeno přímo k ní (název organizace je oddělen pomlčkou od názvu města). Způsob měření je opět shodný s kapitolou 4.3. Změřená t_{RTT} označuje dobu obousměrného zpoždění k cíli, k výpočtům je ale použita hodnota zpoždění jednosměrného t , vypočítaná dle 4.1. Počet skoků k cíli n je zjištěn pomocí programů na určování trasy, skutečná délka cesty l_{skut} je získána sečtením nejkratší možné cesty z Brna do příslušného měst z mapy na obrázku 3.1. Ideální zpoždění pro jednu stanici t_{MZ} je vypočítáno podle vztahu 4.2. Pro soubor latencí mezilehlých zařízení byl vypočítán průměr, medián, minimum a maximum, z těchto hodnot bylo zvoleno rozmezí 0,08 – 0,155 ms pro další výpočet ideálního zpoždění na jeden skok.

4.4.1 Výpočet doby zpoždění na jeden skok

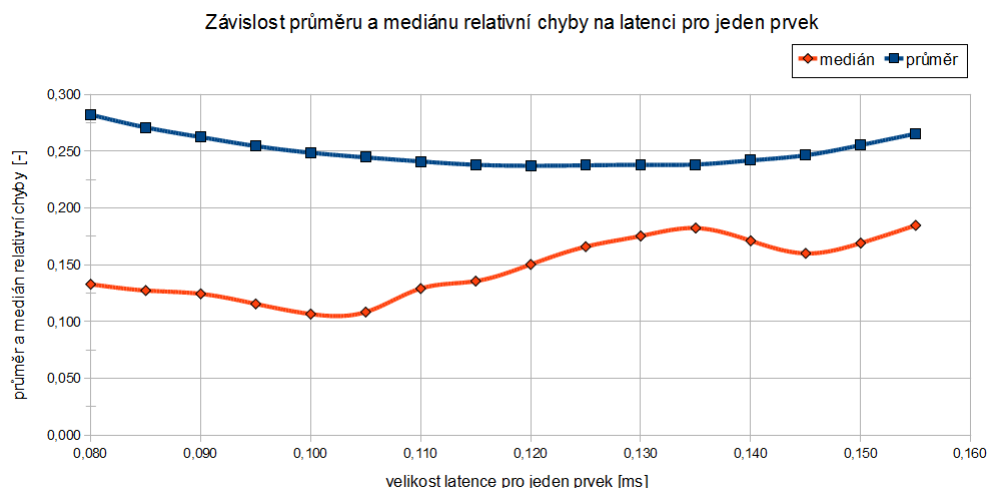
Doba zpoždění pro jeden prvek (jeden skok) je vypočítána stejným způsobem jako v kapitole 4.3.1, značení zůstává stejné – skutečná délka optického kabelu mezi městy l_{skut} , konstanta zpoždění dobou šíření signálu $c_{\text{rs}} = 5,13 \text{ ns/Km}$, počet skoků n a jednosměrné zpoždění t . Vypočítané relativní chyby pro jednotlivé cílové stanice a celkem 16 hodnot zpoždění pro jedno mezilehlé zařízení t_{MZ} byly získány pomocí vztahů 4.3 a 4.2. Výsledky jsou uvedeny v příloze v tabulkách A.3 a A.4. Pro každé zpoždění na jedno mezilehlé zařízení je vypočítán průměr a medián relativní chyby celého souboru měření.

Průměr a medián jsou opět vyneseny do grafu (obrázek 4.5). Nejnižší hodnota relativní chyby pro jednotlivé křivky odečtená z grafu může být považována za ideální hodnotu zpoždění na jedno mezilehlé zařízení. Pro graf průměru relativní chyby jsem odečetl **0,120 ms**, křivka mediánu nabývala minima v **0,100 ms**.

4.4.2 Výpočet délky trasy kabelu z naměřených hodnot

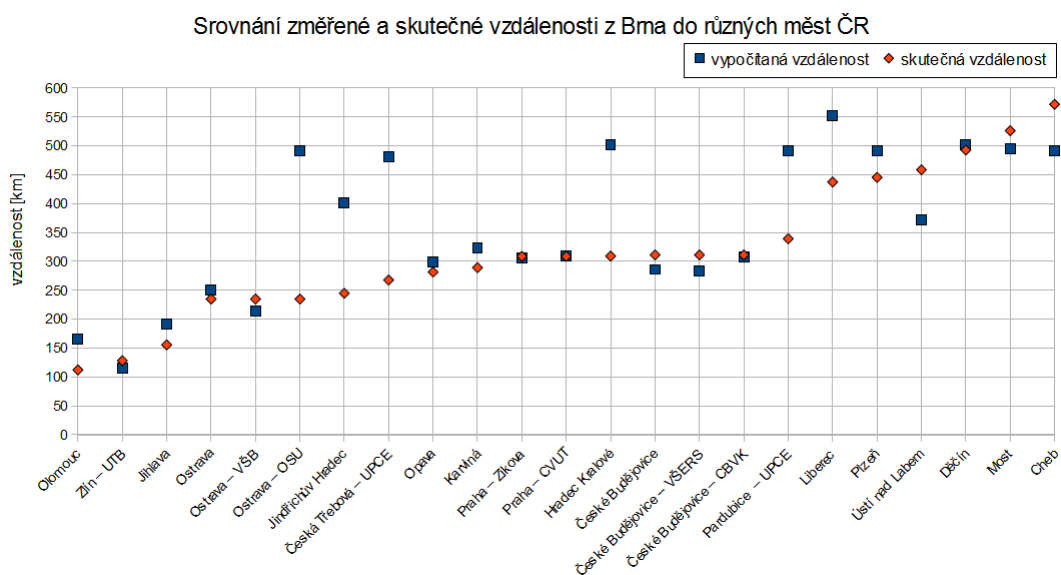
Cílem dalšího výpočtu (stejně jako v kapitole 4.3.2) je zjistit s jakou přesností je možné spočítat fyzickou délku trasy ze znalosti jednosměrného zpoždění t a počtu skoků n . K výpočtu je použita rovnice 4.4, kde jsou navíc dosazeny konstanty rychlosti šíření signálu c_{rs} a doby zpoždění na jedno mezilehlé zařízení t_{MZ} . Doba zpoždění na jedno mezilehlé zařízení je pro tento výpočet zvolena 0,100 ms, dle výsledků měření z předchozí kapitoly. Pro kvalitativní srovnání výsledků je zároveň za pomoci známé hodnoty skutečné délky kabelů l_{skut} vypočtena relativní chyba měření δ .

Výsledky výpočtu jsou uvedeny v tabulce 4.3 a pro jednotlivá měření je do grafu (obrázek 4.6) vyneseno srovnání skutečné a vypočítané vzdálenosti. Další graf (obrázek 4.7) zobrazuje relativní chyby pro jednotlivá měření. Posledních pět řádků

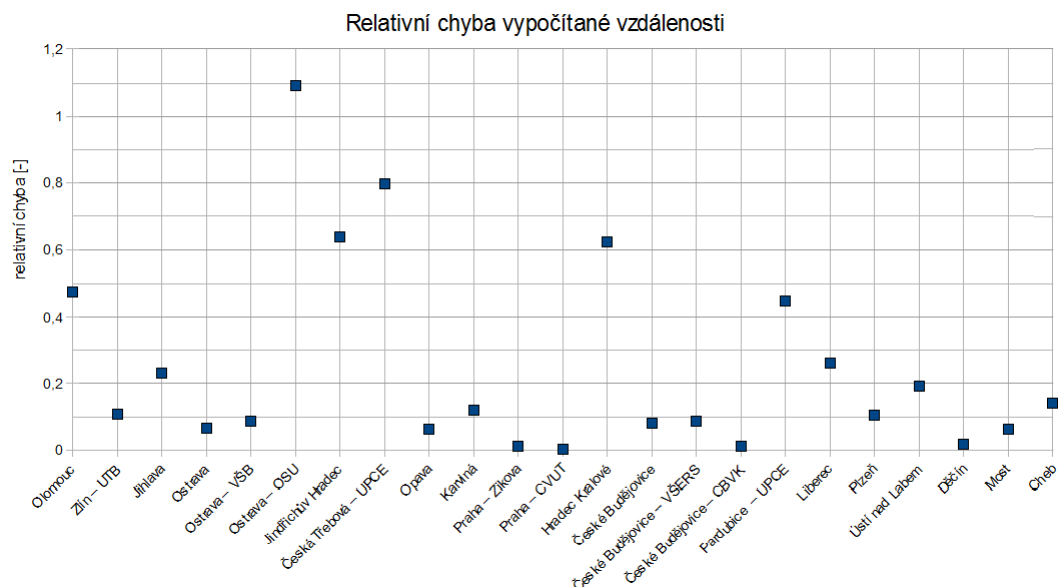


Obr. 4.5: Graf průměrů a mediánů přesností pro různé doby zpoždění na jedno mezilehlé zařízení, pro první prvek sítě na vzdáleném místě.

tabulky obsahuje statistické hodnoty relativních chyb (průměr, medián, minimum, maximum a směrodatnou odchylku).



Obr. 4.6: Graf vypočítané a skutečné délky cesty, pro první prvky sítě v různých městech sítě CESNET2.



Obr. 4.7: Graf přesnosti vypočítané vzdálenosti, pro první prvky sítě v různých městech sítě CESNET2.

4.5 Aplikace výsledků měření na uzly v síti Internet

Poslední měření zpoždění jsem provedl pro vybrané university rozmístěné po celém světě. V tabulce 4.4 je uvedeno změřené zpoždění a počet skoků stejně, jako tomu bylo v předchozích kapitolách. Z naměřených hodnot je dle rovnice 4.3 vypočítaná pravděpodobná fyzická vzdálenost mezi Brnem a příslušným městem. Dále je tato hodnota porovnána s délkou přímé vzdálenosti mezi městy a je vypočítán poměr těchto vzdáleností ($\frac{l_{\text{vypoč}}}{l_{\text{prima}}}$). Průměrný poměr mezi vypočítanou a přímou vzdálenostmi je **2,61** a medián je roven **2,47**. Dle toho můžeme vyslovit obecné tvrzení, že skutečná délka kabelu je přibližně 2,5 krát větší než přímá vzdálenost mezi místy.

Kontrola měření je provedena pomocí výpočtu relativní chyby (dle vztahu 4.3) pro města se známou skutečnou vzdáleností (viz obrázek 3.1) – Bratislavu a Vídeň. Relativní odchylka změřené vzdálenosti se od skutečné lišila o 25 %. Pravděpodobně bude tato odchylka pro ostatní města jiná, ale bez znalosti přesné vzdálenosti o tom nelze rozhodnout.

město	l_{skut} [km]	l_{vypoc} [km]	l_{prima} [km]	δ [-]	$\frac{l_{\text{prima}}}{l_{\text{skut}}}$ [-]
Olomouc – KMO	112,4	213,9	64	0,903	1,76
Olomouc – UPOL	112,4	326,5	64	1,905	1,76
Olomouc – VKOL	112,4	180,6	64	0,607	1,76
Zlín	128,4	129,5	77	0,009	1,67
Jihlava	155,7	153,9	78	0,012	2,00
Ostrava – VŠB	235,0	238,3	141	0,014	1,67
Ostrava – OU	235,0	262,4	141	0,117	1,67
Ostrava – SVKOS	235,0	270,5	141	0,151	1,67
Jindřichův Hradec	245,0	355,2	117	0,450	2,09
Česká Třebová	267,9	507,6	80	0,895	3,35
Opava	281,7	267,3	124	0,051	2,27
Karviná	289,4	295,6	157	0,021	1,84
Praha – VŠCHT	308,9	290,0	187	0,061	1,65
Praha – AMU	308,9	255,4	187	0,173	1,65
Praha – AVU	308,9	279,8	187	0,094	1,65
Praha – AV	308,9	268,9	187	0,129	1,65
Praha – ČVUT	308,9	304,9	187	0,013	1,65
Praha – ČZU	308,9	458,7	187	0,485	1,65
Praha – UK	308,9	292,3	187	0,054	1,65
Praha – VŠE	308,9	297,4	187	0,037	1,65
Hradec Králové – UK	309,4	532,1	126	0,720	2,46
Hradec Králové – KHK	309,4	507,1	126	0,639	2,46
České Budějovice – ČBVK	311,4	339,3	158	0,090	1,97
České Budějovice – JČU	311,4	293,9	158	0,056	1,97
České Budějovice – VŠERS	311,4	316,3	158	0,016	1,97
Pardubice	339,4	512,0	112	0,509	3,03
Liberec	437,6	554,6	208	0,267	2,10
Plzeň – FN	445,6	469,8	242	0,054	1,84
Plzeň – UK	445,6	474,9	242	0,066	1,84
Plzeň – ZČU	445,6	462,7	242	0,038	1,84
Ústí nad Labem – SVKUL	458,9	470,1	247	0,024	1,86
Ústí nad Labem – UJEP	458,9	431,5	247	0,060	1,86
Děčín	492,9	467,3	246	0,052	2,00
Most	526,5	514,7	258	0,022	2,04
Cheb	572,1	569,8	321	0,004	1,78
průměr:				0,251	2,08
medián:				0,061	1,98
minimum:				0,004	1,65
maximum:				1,905	3,35
směrodatná odchylka:				0,392	0,46

Tab. 4.2: Tabulka obsahující skutečnou, přímou hodnotu vzdálenosti k městům v síti CESNET2 a jejich srovnání.

město	adresa stanice	l_{skut} [Km]	t_{RTT} [ms]	n [-]	t [ms]	t_{MZ} [ms]	l_{vypoc} [Km]	δ [-]
Olomouc	195.113.157.162	112,4	2,901	6	1,451	0,146	165,8	0,465
Zlín – UTB	195.178.88.67	128,4	2,177	5	1,089	0,086	114,7	0,116
Jihlava	195.113.179.118	155,7	2,964	5	1,482	0,137	191,4	0,222
Ostrava	195.113.113.202	235,0	3,568	5	1,784	0,116	250,3	0,060
Ostrava – VŠB	195.113.113.70	235,0	3,200	5	1,600	0,079	214,4	0,093
Ostrava – OSU	195.113.124.150	235,0	6,049	5	3,025	0,364	492,1	1,089
Jindřichův Hradec	195.178.64.90	245,0	5,114	5	2,557	0,260	401,0	0,632
Č. Třebová – UPCE	195.113.124.150	267,9	5,937	5	2,969	0,319	481,2	0,792
Opava	195.113.156.146	281,7	4,074	5	2,037	0,118	299,6	0,059
Karviná	195.113.156.150	289,4	4,321	5	2,161	0,135	323,7	0,114
Praha – Žikova	195.113.69.53	308,9	4,135	5	2,068	0,097	305,6	0,015
Praha – CVUT	195.113.144.174	308,9	4,182	5	2,091	0,101	310,1	0,000
Hradec Kralové	195.113.115.98	309,4	6,151	5	3,076	0,298	502,0	0,619
České Budějovice	195.113.156.142	311,4	3,935	5	1,968	0,074	286,1	0,085
Č. Budějovice – VŠERS	195.113.220.241	311,4	3,915	5	1,958	0,072	284,1	0,091
Č. Budějovice – CBVK	195.113.145.10	311,4	4,155	5	2,078	0,096	307,5	0,016
Pardubice – UPCE	195.113.124.150	339,4	6,051	5	3,026	0,257	492,3	0,447
Liberec	147.230.250.50	437,6	6,658	5	3,329	0,217	551,5	0,258
Plzeň	147.228.200.1	445,6	6,050	5	3,025	0,148	492,2	0,102
Ústí nad Labem	195.113.197.228	458,9	5,408	8	2,704	0,044	371,2	0,194
Děčín	195.113.144.218	492,9	6,144	5	3,072	0,109	501,4	0,015
Most	195.113.144.98	526,5	6,070	5	3,035	0,067	494,2	0,064
Cheb	195.113.124.150	572,1	6,040	5	3,020	0,017	491,2	0,143
						průměr:	0,146	0,249
						medián:	0,116	0,114
						minimum:	0,017	0,004
						maximum:	0,364	1,094
						směrodatná odchylka:		0,292

Tab. 4.3: Tabulka naměřených a vypočtených hodnot zpoždění a vzdáleností pro první síťový prvek v různých místech sítě CESNET2.

město	doménové jméno	l_{prima} [km]	t_{RTT} [ms]	n [-]	t [ms]	l_{vypoc} [km]	$\frac{l_{\text{prima}}}{l_{\text{vypoc}}}$ [-]	l_{skut} [km]	δ [-]
Vídeň	www.univie.ac.at	110	2,92	8	1,46	169	1,54	224	0,246
Bratislava	www.vsvu.sk	121	2,39	6	1,20	150	1,24	200	0,248
Košice	www.tuke.sk	344	7,65	9	3,82	613	1,78		
Berlín	www.tu-berlin.de	434	26,56	11	13,28	2423	5,58		
Varšava	www.pw.edu.pl	459	16,89	11	8,45	1481	3,23		
Stockholm	www.su.se	1133	35,57	12	17,79	3285	2,90		
Atény	www.uoa.gr	1372	43,27	11	21,63	4051	2,95		
Moskva	www.msu.ru	1592	62,87	18	31,43	5846	3,67		
Madrid	www.suffolk.es	1870	64,77	15	32,38	6081	3,25		
New York	library.nyu.edu	6765	103,50	26	51,75	9673	1,43		
Los Angeles	www.ucla.edu	9752	178,84	17	89,42	17165	1,76		
Sydney	www.usyd.edu.au	15963	336,87	18	168,44	32552	2,04		
průměr:							2,61		
medián:							2,47		
minimum:							1,24		
maximum:							5,58		

Tab. 4.4: Naměřené hodnoty zpoždění, počtu skoků, přímé a vypočítané vzdálenosti pro různě vzdálená místům po celém světě.

5 SIMULACE PŘENOSOVÉHO SYSTÉMU

Testování rozsáhlých počítačových sítí v laboratorním prostředí je nemožné, proto je účinným pomocníkem simulace. V této práci jde o simulaci přenosového řetězce od zdroje k cíli. Cílem je připravit simulaci reálné sítě, především z hlediska účinků zpoždění na přenosové trase. K tomu je využito simulačního prostředí NS2, awk skriptu pro zpracování dat a programů ke generování grafů (xgraph a gnuplot).

5.1 Simulační nástroj NS2

Network simulator druhé verze (NS2) je program sloužící k simulaci různých komunikačních sítí. Byl vyvinut na americké universitě v Berkeley a je šířen jako Open Source pro operační systémy Linux a Unix. Jádro NS2 je napsáno v jazyce C++, simulace a spouštění událostí je naprogramováno objektovým TCL. V jazyce TCL se také píše kód pro simulaci.

NS2 podporuje mnoho protokolů, směrovacích systémů, typů front a případné chybějící možnosti si může uživatel naprogramovat. Všechny informace k programu, především popis vlastností a možnosti jejich použití najdeme v obsáhlém manuálu [30].

Pokud máme napsaný kód simulace, nic nebrání jejímu spuštění z terminálu pomocí příkazu `ns` a názvu souboru s TCL kódem simulace.

5.1.1 Grafické zobrazení výsledků

Program simulace NS2 vytvoří pouze data o simulaci, proto je nutné použít jiných programů pro jejich grafické zobrazení. Spuštění těchto programů může být definováno přímo v tcl skriptu tak, aby se po simulaci přímo zobrazily výsledky. Pro zpracování dat výsledků je možné použít awk skript, který pro každý řádek výstupních dat provede definovanou sekvenci operací. S výhodou je přistupováno k odděleným hodnotám řádku jako k položkám v poli.

Zobrazení simulace v programu NAM

Grafické zobrazení výsledku simulace se provádí v komponentě NS2 nazvané NAM (Network AniMator). K otevření se použije příkaz `nam`, za kterým následuje název souboru s uloženou simulací. Po spuštění programu NAM se otevře okno se simulovanou sítí uprostřed a s ovládacími prvky na krajích.

Program XGraph

XGraph je program ke generování grafů, který je součástí balíku NS2. Program dokáže vygenerovat pouze 2D grafy, ale umí zobrazit více průběhů do jednoho grafu. Jeho okno obsahuje několik tlačítek, kterými lze graf přiblížit, vybrat jeho část, nebo uložit do formátu PostScript, PDF nebo MIF (Marker Interchange Format) [31].

Program Gnuplot

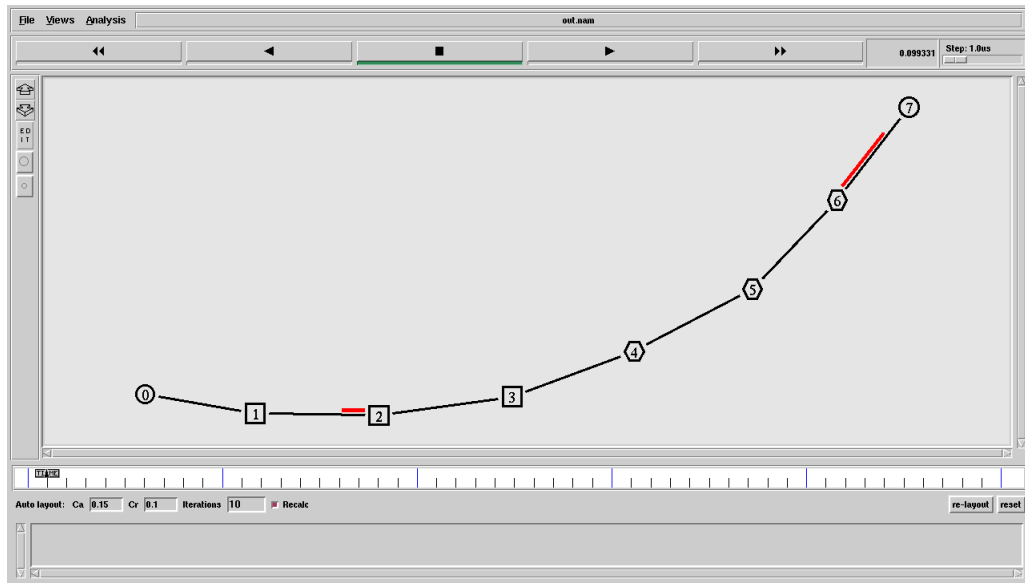
Gnuplot je volně dostupný program pro Linux, MS Windows, OS/2 a další operační systémy. Slouží k tvorbě grafů matematických funkcí nebo vykreslení surových dat. Dokáže vytvořit 2D i 3D grafy, dle nastavení vykreslí pouze body, čáry, plochu, ... Výstupem je okno s grafem, kterým lze v případě 3D grafu otáčet. Samozřejmě je uložení grafu do několika grafických formátů (JPG, PDF, PNG, PostScript, \LaTeX , ...) [32].

5.2 Simulace latence přepínačů a směrovačů

Jedná se o simulaci závislosti doby zpoždění na počtu přepínačů a směrovačů. Výsledkem simulace jsou především data pro vynesení těchto závislostí do grafů. Simulace je realizována tcl skriptem pro NS2, který je na přiloženém CD.

5.2.1 Způsob realizace

Simulace se sestává z řetězce uzlů, které představují směrovače a přepínače na přenosové trase. Zpoždění ve směrovačích a přepínačích je realizováno pomocí prvku Delay Box, který umožňuje nastavit zpoždění, rychlost linky a ztrátovost pro tento prvek. Doba zpoždění je reprezentována pomocí generátoru rovnoměrného rozložení náhodných čísel. V souboru simulace jsou v záhlaví uvedeny čtyři proměnné, které umožňují definovat minimální a maximální velikost zpoždění (v milisekundách) pro směrovače, respektive přepínače. Dále lze definovat parametry linek, které mají vliv na velikost serializačního zpoždění (velikost paketu a rychlost linek) a zpoždění rychlostí šíření signálu. Taktéž se v záhlaví programu nastavuje maximální počet směrovačů a přepínačů. Dle těchto parametrů je vygenerován simulační model – např. pro tři směrovače a tři přepínače (viz obrázek 5.1). Nejprve jsou na trase zařazeny všechny směrovače a teprve za nimi přepínače, to z důvodu zjednodušení dalších výpočtů. Další data jsou zpracována awk skriptem, který vypočítá velikost zpoždění pro všechny kombinace uzlů zařazené za sebou (1 směrovač a 0 přepínačů, 1 směrovač a 1 přepínač, 1 směrovač a 2 přepínače, ...).



Obr. 5.1: Obrázek okna simulace pro tři směrovače a tři přepínače.

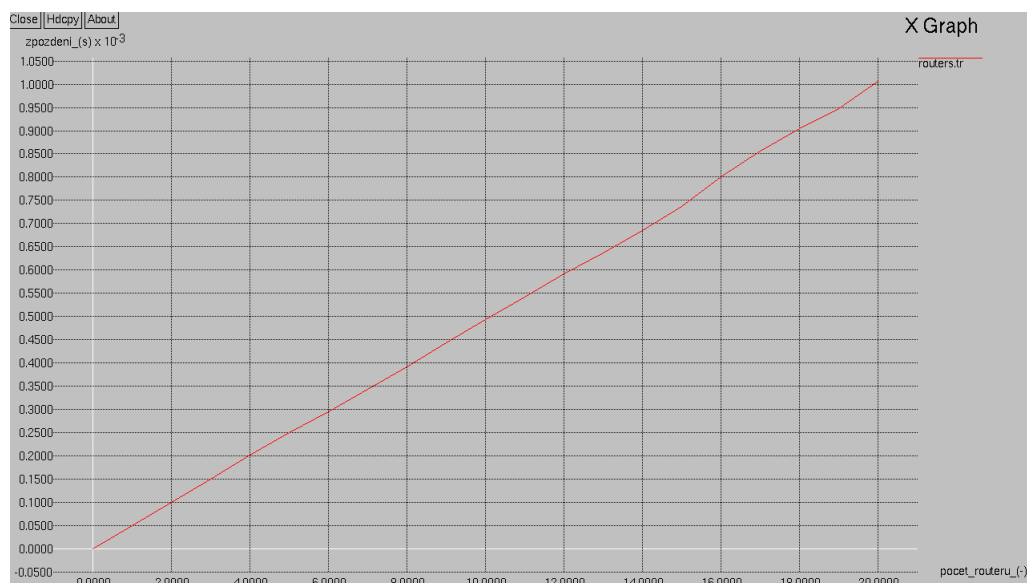
5.2.2 Výsledky simulace

Simulace je definována ve skriptu s názvem `routersSwitches.tcl`, pro následující výsledky bylo v záhlaví nastaveno:

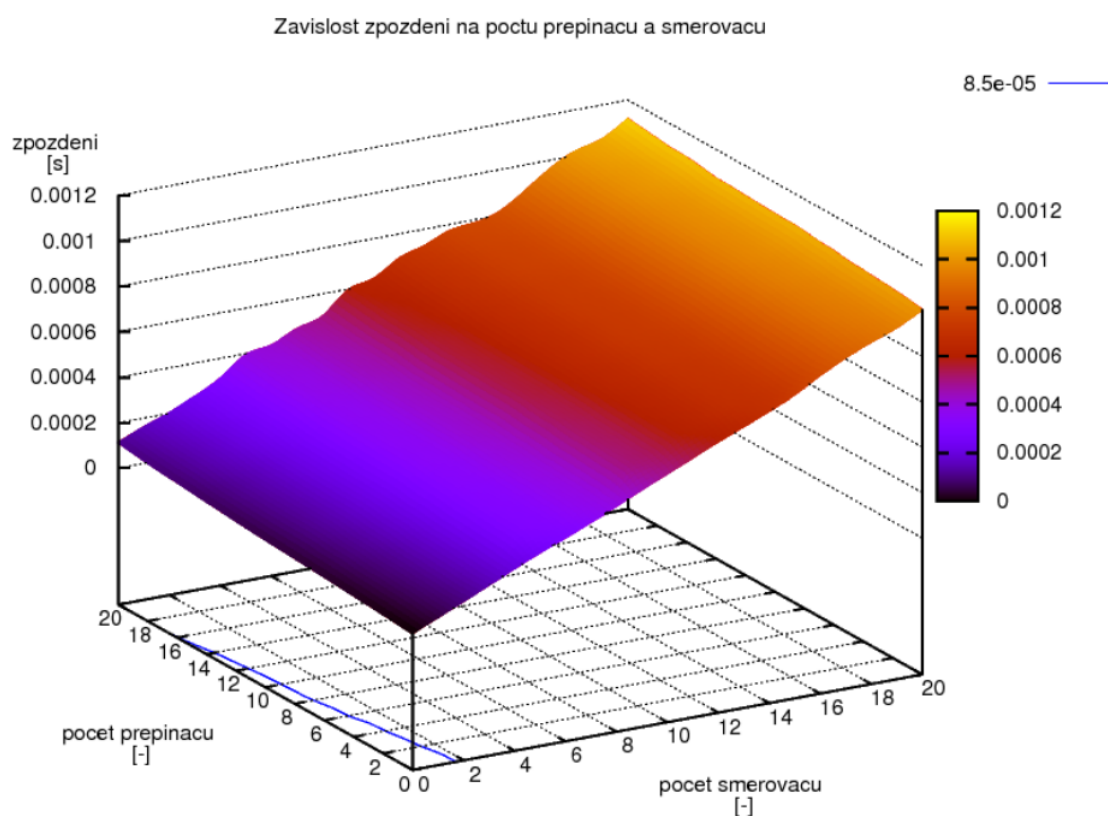
- počet směrovačů = 20,
- počet přepínačů = 20,
- minimální zpoždění směrovače = $10 \mu s$,
- maximální zpoždění směrovače = $100 \mu s$,
- minimální zpoždění přepínače = $1 \mu s$,
- maximální zpoždění přepínače = $10 \mu s$,
- rychlost přenosových linek = 10 Gb/s,
- velikost paketu = 64 B,
- doba zpoždění rychlostí šíření signálu = 0 s.

Výsledná data simulace jsou zobrazena nejprve v programu *XGraph* jako závislost zpoždění na počtu směrovačů (obrázek 5.2). Vidíme že zpoždění lineárně roste s počtem směrovačů, drobná zakřivení jsou způsobena náhodným rozložením.

Dalším výstupem simulace je soubor, ve kterém jsou pro každou kombinaci počtu směrovačů a přepínačů uvedeny průměrné hodnoty zpoždění. Pokud otevřeme krátký skript `routersSwitches.plt` (taktéž na příloženém CD) v programu *Gnuplot* zobrazí se 3D graf (obrázek 5.3) nasimulovaných dat. Jedná se o graf závislosti zpoždění na dvou proměnných (počet směrovačů a přepínačů). Výsledkem je lineárně rostoucí plocha, která je více skloněná ve směru rostoucího počtu směrovačů, tzn. směrovače ovlivňují zpoždění několikanásobně více než přepínače.



Obr. 5.2: Závislost zpoždění na počtu směrovačů.



Obr. 5.3: Závislost zpoždění na počtu přepínačů a směrovačů.

Na základně téhož grafu (obrázek 5.3) je vynesena křivka pro velikost zpoždění 0,085 ms. To je hodnota zpoždění na jeden skok zjištěná v kapitole 4.3.1 a podle

této křivky můžeme odečíst kolika prvkům sítě zpoždění 0,085 ms odpovídá. Pokud budeme uvažovat jedno zařízení třetí vrstvy RM OSI – směrovač, tak můžeme odečíst přibližně 6 přepínačů. Tato čísla jsou pouze teoretická a odpovídají vypočítanému mediánu hodnoty zpoždění na jeden skok.

5.3 Simulace zpoždění délky trasy a počtu skoků

Tato část simuluje přenosovou cestu složenou z definovaného počtu skoků (směrovačů) a transportních linek o známé délce a přenosové rychlosti. Pro tuto simulaci je připravený skript `routersLenght.tcl`, který vytvoří data pro zadaný rozměr simulace (počet skoků a délka trasy). Dále se v záhlaví skriptu nastavuje rychlost linek, minimální a maximální doba zpoždění směrovače. Skript vygeneruje přenosovou trasu se zadaným počtem směrovačů n (realizováno pomocí Delay Box) a linkami mezi nimi. Délka linek se snaží co nejlépe pokrýt celé spektrum vzdáleností do maximální zadané vzdálenosti. Minimální vzdálenost uzlů je l_{\min} vypočítaná dle vztahu 5.1 a postupně narůstá dle vztahu 5.2, celá trasa (v součtu) je rovna definované délce l_{\max} . Délka trasy je následně převedena na dobu zpoždění vynásobením konstantou rychlosti šíření signálu $c_{rs}=0,513 \mu\text{s}/\text{km}$.

$$l_{\min} = \frac{2 \cdot l_{\max}}{(n+1) \cdot (n+2)}. \quad (5.1)$$

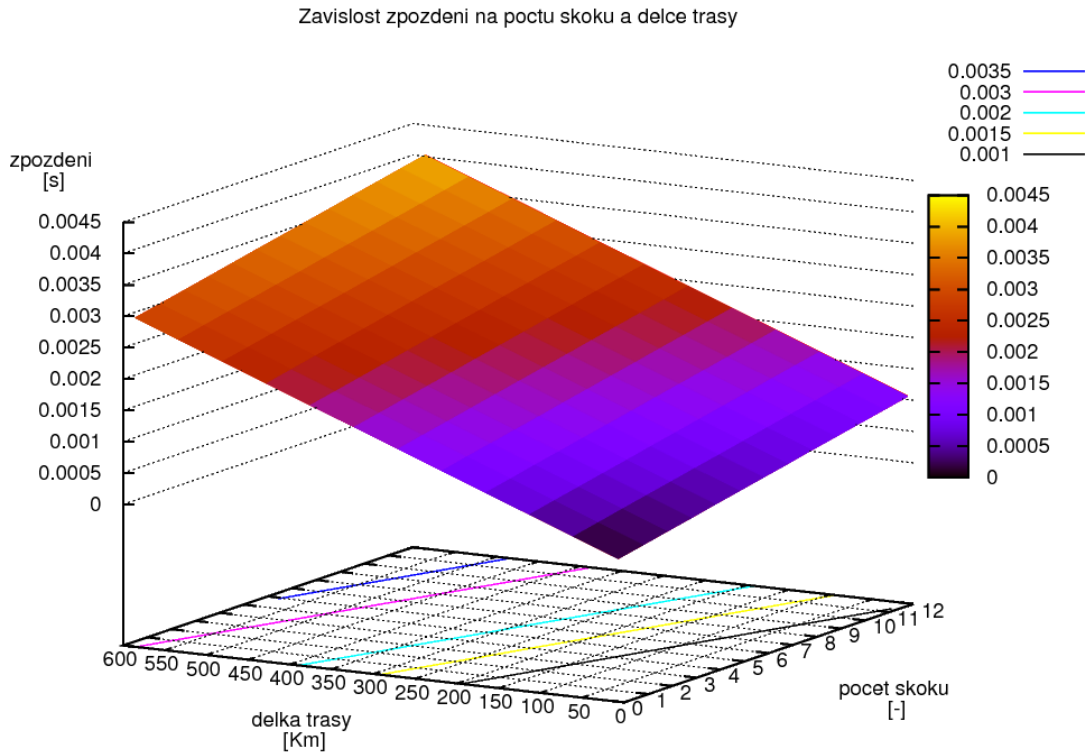
$$l_n = l_{n-1} + l_{\min}. \quad (5.2)$$

5.3.1 Simulace zpoždění v síti CESNET2

První simulace je provedena pro síť podobnou síti CESNET2, kvůli možnosti porovnání výsledků z měření v této síti. Proto je nastavení simulace přizpůsobeno hodnotám z kapitoly 4.3, kde je nejvyšší počet skoků 12 a nejdelší vzdálenost mezi městy 572 Km. V záhlaví skriptu je tedy nastaveno následující:

- počet směrovačů = 12,
- délka trasy = 600 Km,
- minimální zpoždění směrovače = $85 \mu\text{s}$,
- maximální zpoždění směrovače = $85 \mu\text{s}$,
- rychlost přenosových linek = 10 Gb/s,
- velikost paketu = 64 B.

Opět je nejprve zobrazen 2D graf, nyní závislosti zpoždění na délce trasy, což je lineárně rostoucí přímka. Dále je vytvořen soubor, který po otevření v programu *Gnuplot*, vytvoří graf závislosti zpoždění na délce trasy a počtu skoků. Zobrazit graf



Obr. 5.4: Závislost zpoždění na počtu směrovačů a délce trasy v síti simulující CEN-SET2.

je možné pomocí skriptu v souboru `routersLenght.plt`, který upraví rozsahy os, rozlišení a celkový vzhled grafu. Výsledný graf je na obrázku 5.4.

Na základnu grafu jsou vyneseny kontury – čáry pro charakteristické doby zpoždění. Jako charakteristická zpoždění byla vybrána města z měření v síti CESNET2 z kapitoly 4.3. Je tedy možné pro města Zlín ($t=1$ ms), Ostrava ($t=1,5$ ms), Praha ($t=2$ ms), Plzeň ($t=3$ ms) a Cheb ($t=3,5$ ms) odečíst pravděpodobný počet skoků a příslušné délky trasy.

5.3.2 Simulace zpoždění v celosvětové síti

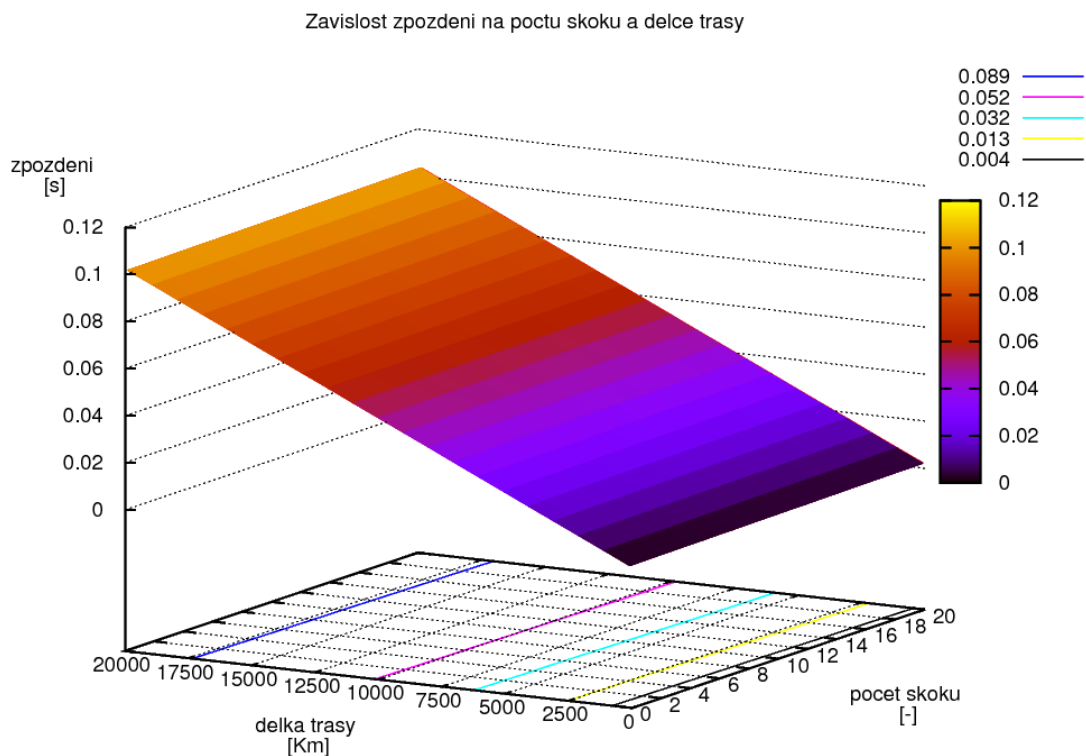
Druhá simulace opět založená na skriptu `routersLenght.tcl` představuje závislost zpoždění na vzdálenostech pro všechny body na planetě – do 20 000 Km¹. Celkové nastavení simulace je toto:

- počet směrovačů = 20,
- délka trasy = 20 000 Km,
- minimální zpoždění směrovače = 85 μ s,

¹Obvod Země je přibližně 40 000 Km, pro dosažení kteréhokoliv bodu přímou cestou postačí polovina této vzdálenosti.

- maximální zpoždění směrovače = $85 \mu\text{s}$,
- rychlost přenosových linek = 10 Gb/s ,
- velikost paketu = 64 B .

Hlavním výsledkem je graf zobrazující závislost zpoždění na počtu skoků a délce trasy. Tento graf (obrázek 5.5) je vytvořen otevřením skriptu `routersLenght.plt` v programu *Gnuplot*. Ve výsledném grafu jsou na základě opět vyneseny křivky pro určitou velikost zpoždění. Hodnoty zpoždění odpovídají naměřeným hodnotám v kapitole 4.5 pro vybraná města: Košice (4 ms), Berlín (13 ms), Madrid (32 ms), New York (50 ms) a Los Angeles (90 ms). Z těchto křivek lze odečíst pro zjištěný počet skoků pravděpodobnou délku fyzické trasy.



Obr. 5.5: Závislost zpoždění na počtu směrovačů a délce trasy simulující celosvětovou síť.

6 ZÁVĚR

Zpoždění vznikající na trase internetu může být velmi kritické pro aplikace pracující v reálném čase, a proto je důležité zjistit, kde zpoždění vzniká a zda jej lze snížit. Tato práce obsahuje kompletní shrnutí informací o zdrojích zpoždění a jejich obvyklých velikostech.

Zpoždění vznikající v koncových zařízeních závisí na podobě produkované (konzumované) informace, zatížení a výkonu stanice. Latence zdroje či cíle nemá hlavní vliv na velikost celkového zpoždění. Velkým zdrojem latence jsou především dlouhé přenosové linky, na nichž je výrazné zpoždění rychlostí šíření, které nemůže být menší než 0,5 ms na 100 kilometrů. Další zpoždění vznikající na lince je způsobeno rychlostí linky a velikostí paketu. Při malých paketech a linkách o rychlostech v řádech gigabitů za sekundu je však toto serializační zpoždění zanedbatelné. Posledním významným zdrojem zpoždění jsou mezilehlá zařízení (především směrovače a prepínače), u nich je zpoždění často nejvíce závislé na aktuálním zatížení. Minimální hodnoty latence těchto mezilehlých prvků jsou podrobně uvedeny v práci. Doba zpoždění nezatíženého směrovače se pohybuje mezi 10 až 100 μ s, oproti tomu prepínač je přibližně desetkrát rychlejší.

V práci jsou rozebrány reálné typy sítí a jejich případné dělení. Zmíněno je především dělení na přístupovou a transportní část sítě. Přístupová část je realizována různými technologiemi za účelem efektivního přístupu k danému uživateli a jeho místní síti. Od použité technologie připojení se odvíjí také doba zpoždění, např. pro bezdrátové technologie je charakteristická nízká rychlost připojení a poměrně dlouhá doba přístupu k médiu. U technologií připojených kabelem je zpoždění mnohem nižší. V transportních sítích se povětšinou setkáme s optickými vlákny s vysokými přenosovými rychlostmi. Zpoždění v transportní síti je nejvíce závislé na délce vedení. Počet mezilehlých zařízení ovlivňuje zpoždění především v krátkých sítích a jeho velikost je závislá na počtu prvků a jejich aktuálním zatížení.

Měření zpoždění a parametrů sítě se používá pro analýzu velikosti zpoždění a dalších parametrů sítě. Pro tyto úkoly dnes existuje mnoho programů i hardwarových řešení, mezi nejjednodušší a nejčastěji používané patří program Ping, který ovšem měří obousměrné zpoždění. Pro zjištění počtu uzlů na trase se používá program Traceroute.

V praktické kapitole je proměřena velikost zpoždění k různým organizacím ze sdružení Cesnet, protože je v této síti známa skutečná délka kabelu. Toho je využito k výpočtu obvyklé velikosti zpoždění na jeden skok. Nejmenší medián relativních chyb je zjištěn pro velikost zpoždění 0,085 ms na jeden skok. Dále je za použití tohoto zpoždění vypočítána délka kabelu, která je následně srovnána se skutečnou délkou kabelu. Toto srovnání je vyneseno do grafu, další graf zobrazuje relativní chyby

měření. Pro lepší přesnost bylo to stejné měření provedeno také pro první prvek sítě v různých městech sítě CESNET2, ale velikost zpoždění k těmto prvkům je často větší než k příslušným organizacím, proto jsou tyto výsledky brány spíše jako orientační. Zjištěná latence jednoho skoku je aplikována pro výsledky měření zpoždění k městům v celosvětové síti. Výsledkem je vypočítaná vzdálenost, ale poměr vypočítané a přímé vzdálenosti. Pro data ze všech měření vyplývá, že skutečná vzdálenost je průměrně 2,5 krát větší než přímá vzdálenost.

Poslední část práce obsahuje simulaci sítě v programu Network Simulator 2. Je simulován vliv jednotlivých latencí na celkovou velikost zpoždění. Vytvořené skripty umožňují nakonfigurovat parametry sítě – rychlost linek, velikost paketu, minimální a maximální dobu zpoždění směrovače a přepínače. První skript simuluje závislost zpoždění na počtu směrovačů a přepínačů v síti. Výsledkem je 2D graf zobrazující lineární závislost velikosti zpoždění na počtu routerů. Graf se třemi osami zobrazuje velikost zpoždění odpovídající pro rostoucí počet směrovačů a přepínačů (0 až 20). Na základně grafu je vynesena kontura zobrazující zpoždění 0,085 ms, podle které je možné odečíst počet prvků (např. jeden směrovač a šest přepínačů).

Druhý skript umožňuje vytvořit 3D graf závislosti zpoždění na počtu skoků a délce trasy. Výsledkem jsou dva vygenerované grafy. První zobrazuje situaci v síti CESNET2 (max. 600 Km a 12 skoků) a pro některá naměřená zpoždění jsou na základnu grafu vyneseny kontury – je z nich možné odečíst vzdálenost pro určitý počet skoků. Druhý graf je pro celosvětovou síť, protože zobrazuje vzdálenosti až 20 000 Km a maximálně 20 skoků. V tomto grafu je vidět zanedbatelný počet skoků v porovnání se zvyšující se vzdáleností. Vynesené křivky naměřených zpoždění (k městům v celosvětové síti) určují přibližnou délku kabelu do těchto měst.

Tato práce podrobně mapuje zdroje zpoždění v datových sítích, popisuje různé možnosti měření zpoždění. Závěr práce je věnován ověření teoretických poznatků a vytvoření simulací přenosového řetězce. Výpočty délky fyzické cesty je možné využít například pro přesnější určení geografické polohy stanice.

LITERATURA

- [1] PUŽMANOVÁ, R. TCP/IP v kostce. 1. vyd. České Budějovice : Kopp, 2004. 607 s. ISBN 80-7232-236-2.
- [2] ABRAHAO, B. KLEINBERG, R. *On the Internet Delay Space Dimensionality* [online]. ACM/SIGCOMM Internet Measurement Conference (IMC'08). Association for computing machinery, 2009. [cit. 13. 10. 2009]. Dostupný z WWW: <www.cs.cornell.edu/ abrahao/docs/imc08.pdf>.
- [3] NG, E. HUI, Z. *Predicting Internet network distance with coordinates-based approaches* [online]. INFOCOM 2002. [cit. 13. 10. 2009]. Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. IEEE, 2002. Dostupný z WWW: <www.cs.rice.edu/ eugeneng/papers/INFOCOM02.pdf>.
- [4] BOVY, C. J., et al. *Analysis of End-to-end Delay Measurement in Internet* [online]. In *Passive & Active Measurement: PAM 2002*, 2002. s. 8. Dostupný z WWW: Dostupný z WWW: <aquila-www.ripe.net>.
- [5] ALAN, Percy. *Understanding Latency in IP Telephony* Telephonyworld.com [online]. 2000 [cit. 2009-12-17]. Dostupný z WWW: <www.embedded-computing.com/pdfs/Brooktrout.Sum00.pdf>.
- [6] *Queuing delay* [online]. 2007, poslední aktualizace 8. 10. 2008 [cit. 2009-12-17]. Dostupný z WWW: <www.hill2dot0.com>.
- [7] MOLNÁR, Karol. *Teorie front.* c2009. Dostupný z WWW: <www.utko.feec.vutbr.cz/ molnar/>. s. 38.
- [8] *VoIP Think* [online]. 2005 [cit. 2010-05-25]. QoS - Quality of Service. Dostupný z WWW: <www.en.voipforo.com>
- [9] *Analýza zpoždění v IP telefonním systému I.* [online]. 9. 5. 2008 [cit. 2009-12-17]. Dostupný z WWW: <access.feld.cvut.cz/>.
- [10] PUŽMANOVÁ, Rita. *Moderní komunikační sítě od A do Z.* 2. aktualiz. vyd. [s.l.] : Computer Press, 2006. 432 s. ISBN 80-251-1278-0.
- [11] *Intelekt* [online]. 2009 [cit. 2009-12-17]. Dostupný z WWW: <www.intelek.cz>
- [12] *Wikipedia* [online]. 2001 [cit. 2009-12-17]. Dostupný z WWW: <en.wikipedia.org>.

- [13] KRUMNIKL, Michal *Měření latence síťových prvků*. [2005]. 15 s. Dostupný z WWW: <www.cs.vsb.cz/gragarek/SPS/>.
- [14] *HP ProCurve switch 1700-8*. [online]. c2008 [cit. 2009-12-17]. Dostupný z WWW: <www.skylabshop.cz>.
- [15] White paper. *Cisco Nexus 5020 Switch Performance in Market-Data and Back-Office Data Delivery Environments*. 2009. 9 s. Dostupný z WWW: <origin-www.cisco.com>.
- [16] BURDA, Karel. *Návrh, správa a bezpečnost počítačových sítí : Síťová vrstva počítačových sítí - směrování*, 2010. 38 s. Presentace. VUT Brno.
- [17] *Internet Core Router Test*. 2001 [cit. 2009-12-17]. Dostupný z WWW:<www.lightreading.com>.
- [18] *Test Traffic Measurements Service* [online]. [2000] [cit. 2009-12-17]. Dostupný z WWW:<www.ripe.net/projects/ttm/>.
- [19] NING, Hua. *IPv6 Core Router : Test Report*. [online], 2003 [cit. 2010-05-25]. Dostupný z WWW:<www.ipv6-tf.com.pt>.
- [20] *Infovista* [online]. 2010 [cit. 2010-05-25]. Broadband and Triple Play. Dostupný z WWW:<www.infovista.com>.
- [21] *RFC 1242. Benchmarking Terminology for Network Interconnection Devices*. Bradner. Harvard University, 2001. 12 s. Dostupný z WWW:<www.ietf.org/rfc/rfc1242.txt>.
- [22] *Catalyst Supervisor Engine 32 PISA Cisco IOS Software Configuration Guide* [online]. 2007 [cit. 2010-05-25]. Using the Layer 2 Traceroute Utility, 4 s. Dostupný z WWW:<www.ciscosystems.com>.
- [23] *InetDaemon : How Ping Works* [online]. [2005] [cit. 2009-12-17]. Dostupný z WWW: <www.inetdaemon.com>.
- [24] *Default time to live (TTL) values* [online]. 2009 [cit. 2010-05-25]. Binbert. Dostupný z WWW: <www.binbert.com>.
- [25] *Hack zone* [online]. 2000 [cit. 2010-05-25]. Bing. Dostupný z WWW: <fgouget.free.fr/bing/index-en.shtml>.
- [26] *Visual Trace Route Tool*. c2009 [cit. 2009-12-17]. Dostupný z WWW: <www.yougetsignal.com/tools/visual-tracert>.

- [27] *NS Tools : Traceroute on a map* [online]. c2009 [cit. 2009-12-17]. Dostupný z WWW: <en.dnstools.ch/visual-traceroute.html>.
- [28] *Visual Route* [online]. c1997-2009 [cit. 2009-12-17]. Dostupný z WWW: <visualroute.visualware.com>.
- [29] *Cesnet* [online]. 1996 [cit. 2010-05-25]. Dostupný z WWW: <www.cesnet.cz>.
- [30] *The ns Manual* FALL Kevin, VARADHAN Kannan . [s.l.] : [s.n.], 2009. 430 s. Dostupný z WWW: <www.isi.edu/nsnam/ns>.
- [31] *XGRAPH : General Purpose 2-D Plotter* [online]. 2006 [cit. 2009-12-17]. Dostupný z WWW: <www.xgraph.org>.
- [32] *GNUPlot* [online]. 2009 [cit. 2009-12-17]. Dostupný z WWW: <www.gnuplot.info>.
- [33] ZVÁROVÁ, Jana. *Základy statistiky pro biomedicínské obory* [online]. 1999 [cit. 2010-05-25]. Výběr a popisné statistiky. Dostupný z WWW: <new.euromise.org/czech/tajne/ucebnice>.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

ADSL	Asymetric Digital Subscriber Line – asymetrická digitální účastnická linka
CDMA	Code division multiple access – technologie pro přenos dat v bezdrátových sítích
DHCP	Dynamic Host Configuration Protocol
EDGE	Enhanced Data Rates for GSM Evolution – technologie rychlého přenosu dat přes GSM infrastrukturu
FF	Fragment Free
FIFO	First In First Out – model fronty
GEO	geostacionary-Earth orbit – geostacionární oběžná dráha
GPRS	General Packet Radio Service – technologie rychlého přenosu dat přes GSM infrastrukturu
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile communications – globální systém pro mobilní komunikaci
ICMP	Internet Control Message Protokol
IEEE	The Institute of Electrical and Electronics Engineers
IP	Internet Protokol
ISP	Internet Service Provider – poskytovatel připojení k Internetu
ISDN	Integrated Services Digital Network – integrovaná síť digitálních služeb
JPG	Joint Photographic experts Group
LAN	Local Area Network – místní síť
LEO	low-Earth orbit – nejnižší oběžná dráha
MAC	Media Access Control – fyzická adresa
MEO	medium-Earth orbit – střední oběžná dráha
MIF	Marker Interchange Format

MPLS	Multiprotocol Label Switching – přepínání na základě multiprotokolových značek
NAT	Network Address Translation – překlad adres
NS2	Network Simulator 2
OSI	Open System Interconnection – referenční model komunikace
PING	Packet InterNet Groper
PNG	Portable Network Graphics
PDF	Portable Document Format
QoS	Quality of Service – kvalita služeb
RTD	Round Trip Delay – obousměrné zpoždění
RTT	Round Time Trip – obousměrné zpoždění
SDH	Synchronous Digital Hierarchy
S&F	Store & Forward
TCL	Tool Command Language
TCP	Transmission Control Protocol – protokol transportní vrstvy OSI
TCP/IP	Transmission Control Protocol/Internet Protocol
TTL	Time To Live – doba života paketu
UDP	User Datagram Protocol – protokol transportní vrstvy OSI
VoIP	Voice over Internet Protocol - hlasové služby po IP protokolu
xDSL	Digital Subscriber Line – digitální účastnická linka
WDM	Wavelength Division Multiplex – vlnový multiplex
WiFi	Wireless Fidelity – bezdrátová síť
WiMax	Worldwide Interoperability for Microwave Access – bezdrátová síť
c	rychlost světla $c = 299\,792\,458\, m/s$

SEZNAM PŘÍLOH

A	Tabulky	60
B	Obsah přiloženého CD	64

A TABULKY

Města	velikost latence na jeden prvek							
	0,065	0,070	0,075	0,080	0,085	0,090	0,095	0,100
Olomouc – KMO	1,077	1,033	0,990	0,947	0,903	0,860	0,817	0,773
Olomouc – UPOL	2,148	2,087	2,026	1,966	1,905	1,844	1,784	1,723
Olomouc – VKOL	0,850	0,789	0,728	0,667	0,607	0,546	0,485	0,425
Zlín	0,130	0,100	0,070	0,039	0,009	0,022	0,052	0,082
Jihlava	0,164	0,120	0,076	0,032	0,012	0,055	0,099	0,143
Ostrava – VŠB	0,080	0,064	0,047	0,031	0,014	0,003	0,019	0,036
Ostrava – OU	0,199	0,179	0,158	0,137	0,117	0,096	0,075	0,054
Ostrava – SVKOS	0,250	0,226	0,201	0,176	0,151	0,126	0,101	0,076
Jindřichův Hradec	0,545	0,521	0,497	0,474	0,450	0,426	0,402	0,378
Česká Třebová	0,953	0,938	0,924	0,909	0,895	0,880	0,866	0,851
Opava	0,032	0,011	0,010	0,031	0,051	0,072	0,093	0,114
Karviná	0,102	0,082	0,062	0,042	0,021	0,001	0,019	0,039
Praha – VŠCHT	0,027	0,005	0,017	0,039	0,061	0,083	0,105	0,128
Praha – AMU	0,060	0,088	0,117	0,145	0,173	0,202	0,230	0,259
Praha – AVU	0,019	0,009	0,037	0,066	0,094	0,123	0,151	0,179
Praha – AV	0,016	0,044	0,073	0,101	0,129	0,158	0,186	0,215
Praha – ČVUT	0,063	0,044	0,025	0,006	0,013	0,032	0,051	0,070
Praha – ČZU	0,561	0,542	0,523	0,504	0,485	0,466	0,447	0,428
Praha – UK	0,035	0,013	0,010	0,032	0,054	0,076	0,098	0,120
Praha – VŠE	0,102	0,067	0,032	0,003	0,037	0,072	0,107	0,141
Hradec Králové – UK	0,783	0,767	0,751	0,735	0,720	0,704	0,688	0,672
Hradec Králové – KHK	0,715	0,696	0,677	0,658	0,639	0,620	0,601	0,582
České Budějovice – ČBVK	0,140	0,127	0,115	0,102	0,090	0,077	0,064	0,052
České Budějovice – JČU	0,006	0,009	0,025	0,041	0,056	0,072	0,088	0,103
České Budějovice – VŠERS	0,066	0,053	0,041	0,028	0,016	0,003	0,009	0,022
Pardubice	0,554	0,543	0,531	0,520	0,509	0,497	0,486	0,474
Liberec	0,312	0,301	0,290	0,278	0,267	0,256	0,245	0,234
Plzeň – FN	0,115	0,100	0,085	0,070	0,054	0,039	0,024	0,008
Plzeň – UK	0,118	0,105	0,092	0,079	0,066	0,053	0,039	0,026
Plzeň – ZČU	0,091	0,078	0,065	0,051	0,038	0,025	0,012	0,001
Ústí nad Labem – SVKUL	0,067	0,056	0,046	0,035	0,024	0,014	0,003	0,008
Ústí nad Labem – UJEP	0,017	0,028	0,039	0,049	0,060	0,070	0,081	0,092
Děčín	0,012	0,022	0,032	0,042	0,052	0,062	0,072	0,082
Most	0,022	0,011	0,000	0,011	0,022	0,033	0,045	0,056
Cheb	0,044	0,032	0,020	0,008	0,004	0,016	0,028	0,040
průměr:	0,299	0,283	0,269	0,259	0,251	0,248	0,248	0,248
medián:	0,102	0,088	0,073	0,066	0,061	0,076	0,098	0,114

Tab. A.1: Relativní chyby vypočítaných vzdáleností pro různé velikosti latence jednoho mezilehlého zařízení, různých organizací sdružení Cesnet – 1.část.

Města	velikost latence na jeden prvek							
	0,105	0,110	0,115	0,120	0,125	0,130	0,135	0,140
Olomouc – KMO	0,730	0,687	0,643	0,600	0,557	0,513	0,470	0,426
Olomouc – UPOL	1,662	1,601	1,541	1,480	1,419	1,359	1,298	1,237
Olomouc – VKOL	0,364	0,303	0,243	0,182	0,121	0,061	0,000	0,061
Zlín	0,113	0,143	0,173	0,204	0,234	0,264	0,295	0,325
Jihlava	0,187	0,231	0,274	0,318	0,362	0,406	0,450	0,494
Ostrava – VŠB	0,052	0,069	0,085	0,102	0,119	0,135	0,152	0,168
Ostrava – OU	0,034	0,013	0,008	0,029	0,049	0,070	0,091	0,112
Ostrava – SVKOS	0,051	0,027	0,002	0,023	0,048	0,073	0,098	0,123
Jindřichův Hradec	0,354	0,330	0,306	0,283	0,259	0,235	0,211	0,187
Česká Třebová	0,837	0,822	0,807	0,793	0,778	0,764	0,749	0,735
Opava	0,134	0,155	0,176	0,197	0,217	0,238	0,259	0,280
Karviná	0,059	0,080	0,100	0,120	0,140	0,160	0,181	0,201
Praha – VŠCHT	0,150	0,172	0,194	0,216	0,238	0,260	0,282	0,304
Praha – AMU	0,287	0,315	0,344	0,372	0,401	0,429	0,457	0,486
Praha – AVU	0,208	0,236	0,265	0,293	0,321	0,350	0,378	0,406
Praha – AV	0,243	0,271	0,300	0,328	0,357	0,385	0,413	0,442
Praha – ČVUT	0,089	0,108	0,127	0,146	0,164	0,183	0,202	0,221
Praha – ČZU	0,409	0,390	0,371	0,352	0,333	0,314	0,296	0,277
Praha – UK	0,142	0,164	0,186	0,208	0,230	0,253	0,275	0,297
Praha – VŠE	0,176	0,211	0,246	0,280	0,315	0,350	0,384	0,419
Hradec Králové – UK	0,657	0,641	0,625	0,609	0,594	0,578	0,562	0,546
Hradec Králové – KHK	0,563	0,545	0,526	0,507	0,488	0,469	0,450	0,431
České Budějovice – ČBVK	0,039	0,027	0,014	0,002	0,011	0,023	0,036	0,048
České Budějovice – JČU	0,119	0,135	0,150	0,166	0,182	0,197	0,213	0,228
České Budějovice – VŠERS	0,034	0,047	0,059	0,072	0,084	0,097	0,110	0,122
Pardubice	0,463	0,451	0,440	0,428	0,417	0,405	0,394	0,382
Liberec	0,223	0,212	0,201	0,189	0,178	0,167	0,156	0,145
Plzeň – FN	0,007	0,022	0,038	0,053	0,068	0,084	0,099	0,114
Plzeň – UK	0,013	0,000	0,013	0,026	0,039	0,052	0,066	0,079
Plzeň – ZČU	0,014	0,027	0,040	0,054	0,067	0,080	0,093	0,106
Ústí nad Labem – SVKUL	0,018	0,029	0,039	0,050	0,061	0,071	0,082	0,092
Ústí nad Labem – UJEP	0,102	0,113	0,123	0,134	0,145	0,155	0,166	0,177
Děčín	0,092	0,101	0,111	0,121	0,131	0,141	0,151	0,161
Most	0,067	0,078	0,089	0,100	0,111	0,122	0,133	0,145
Cheb	0,052	0,064	0,076	0,088	0,099	0,111	0,123	0,135
průměr:	0,250	0,252	0,255	0,261	0,267	0,273	0,279	0,289
medián:	0,134	0,155	0,176	0,189	0,182	0,197	0,211	0,221

Tab. A.2: Relativní chyby vypočítaných vzdáleností pro různé velikosti latence jednoho mezilehlého zařízení, různých organizací sdružení Cesnet – 2.část.

Města	velikost latence na jeden prvek							
	0,080	0,085	0,090	0,095	0,100	0,105	0,110	0,115
	0,080	0,085	0,090	0,095	0,100	0,105	0,110	0,115
Olomouc	0,683	0,631	0,579	0,527	0,475	0,423	0,371	0,319
Zlín – UTB	0,045	0,007	0,031	0,069	0,107	0,145	0,182	0,220
Jihlava	0,355	0,323	0,292	0,261	0,229	0,198	0,167	0,136
Ostrava	0,148	0,127	0,107	0,086	0,065	0,044	0,024	0,003
Ostrava – VŠB	0,005	0,025	0,046	0,067	0,088	0,108	0,129	0,150
Ostrava – OSU	1,177	1,156	1,136	1,115	1,094	1,073	1,053	1,032
Jindřichův Hradec	0,716	0,696	0,676	0,657	0,637	0,617	0,597	0,577
Česká Třebová – UPCE	0,869	0,851	0,833	0,814	0,796	0,778	0,760	0,742
Opava	0,133	0,115	0,098	0,081	0,064	0,046	0,029	0,012
Karviná	0,186	0,169	0,152	0,136	0,119	0,102	0,085	0,068
Praha – Zikova	0,052	0,037	0,021	0,005	0,011	0,027	0,042	0,058
Praha – CVUT	0,067	0,051	0,036	0,020	0,004	0,012	0,028	0,043
Hradec Kralové	0,686	0,670	0,654	0,638	0,623	0,607	0,591	0,575
České Budějovice	0,019	0,034	0,050	0,066	0,081	0,097	0,113	0,128
České Budějovice – VŠERS	0,025	0,041	0,056	0,072	0,088	0,103	0,119	0,135
České Budějovice – CBVK	0,050	0,034	0,019	0,003	0,013	0,028	0,044	0,059
Pardubice – UPCE	0,508	0,494	0,479	0,465	0,451	0,436	0,422	0,407
Liberec	0,305	0,294	0,282	0,271	0,260	0,249	0,238	0,227
Plzeň	0,148	0,137	0,126	0,115	0,105	0,094	0,083	0,072
Ústí nad Labem	0,123	0,140	0,157	0,174	0,191	0,208	0,225	0,242
Děčín	0,057	0,047	0,037	0,027	0,017	0,007	0,003	0,012
Most	0,024	0,034	0,043	0,052	0,061	0,071	0,080	0,089
Cheb	0,107	0,116	0,124	0,133	0,141	0,150	0,158	0,167
průměr:	0,282	0,271	0,262	0,254	0,249	0,244	0,241	0,238
medián:	0,133	0,127	0,124	0,115	0,107	0,108	0,129	0,136

Tab. A.3: Relativní chyby vypočítaných vzdáleností v závislosti na různé velikosti latence jednoho mezilehlého zařízení, pro první uzel v různých městech sítě CESNET2 – 1.část.

Města	velikost latence na jeden prvek							
	0,120	0,125	0,130	0,135	0,140	0,145	0,150	0,155
	0,120	0,125	0,130	0,135	0,140	0,145	0,150	0,155
Olomouc	0,267	0,215	0,163	0,111	0,059	0,007	0,045	0,097
Zlín – UTB	0,258	0,296	0,334	0,372	0,410	0,448	0,486	0,524
Jihlava	0,104	0,073	0,042	0,010	0,021	0,052	0,084	0,115
Ostrava	0,018	0,039	0,059	0,080	0,101	0,122	0,142	0,163
Ostrava – VŠB	0,171	0,191	0,212	0,233	0,253	0,274	0,295	0,316
Ostrava – OSU	1,011	0,990	0,970	0,949	0,928	0,907	0,887	0,866
Jindřichův Hradec	0,557	0,537	0,517	0,497	0,478	0,458	0,438	0,418
Česká Třebová – UPCE	0,723	0,705	0,687	0,669	0,651	0,632	0,614	0,596
Opava	0,006	0,023	0,040	0,058	0,075	0,092	0,109	0,127
Karviná	0,051	0,035	0,018	0,001	0,016	0,033	0,050	0,066
Praha – Zikova	0,074	0,090	0,105	0,121	0,137	0,153	0,169	0,184
Praha – CVUT	0,059	0,075	0,091	0,106	0,122	0,138	0,154	0,170
Hradec Kralové	0,560	0,544	0,528	0,512	0,497	0,481	0,465	0,449
České Budějovice	0,144	0,160	0,175	0,191	0,207	0,222	0,238	0,254
České Budějovice – VŠERS	0,150	0,166	0,182	0,197	0,213	0,228	0,244	0,260
České Budějovice – CBVK	0,075	0,091	0,106	0,122	0,138	0,153	0,169	0,185
Pardubice – UPCE	0,393	0,379	0,364	0,350	0,336	0,321	0,307	0,293
Liberec	0,216	0,205	0,193	0,182	0,171	0,160	0,149	0,138
Plzeň	0,061	0,050	0,039	0,028	0,017	0,006	0,005	0,016
Ústí nad Labem	0,259	0,276	0,293	0,310	0,327	0,344	0,361	0,378
Děčín	0,022	0,032	0,042	0,052	0,062	0,072	0,082	0,092
Most	0,098	0,108	0,117	0,126	0,135	0,145	0,154	0,163
Cheb	0,175	0,184	0,192	0,201	0,210	0,218	0,227	0,235
průměr:	0,237	0,237	0,238	0,238	0,242	0,246	0,255	0,265
medián:	0,150	0,166	0,175	0,182	0,171	0,160	0,169	0,185

Tab. A.4: Relativní chyby vypočítaných vzdáleností v závislosti na různé velikosti latence jednoho mezilehlého zařízení, pro první uzel v různých městech sítě CESNET2 – 2.část.

B OBSAH PŘILOŽENÉHO CD

Součástí práce je přiložené CD obsahující veškeré elektronické materiály použité, nebo zmíněné v práci.

- Elektronická verze práce.
- Použité obrázky.
- Podklady pro měření zpoždění v reálné síti.
 - Skripty použité pro měření zpoždění.
 - Soubory vygenerované pomocí skriptů a obsahující naměřené hodnoty.
 - Dokument `zpozdeni.xls`, vytvořený programem OpenOffice.org Calc, obsahující veškeré tabulky, výpočty a grafy.
- Soubory použité k simulaci zpoždění v IP sítích.
 - Skript `routersSwitches.tcl` pro provedení simulace závislosti zpoždění na počtu směrovačů a přepínačů.
 - Soubor `routersSwitches.plt`, obsahující nastavení grafu pro program Gnuplot.
 - Skript `routersLenght.tcl` pro provedení simulace závislosti zpoždění na počtu skoků a délce trasy.
 - Soubor `routersLenght.plt`, obsahující nastavení grafu pro program Gnuplot.
 - Návod ke spuštění a otevření programů.
 - Vygenerované grafy závislostí, uložené ve formátu png a eps.